



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

POSOUZENÍ OVLADATELNOSTI SEKTORU
JEZOVÉHO POLE VD ROUDNICE NAD LABEM
PŘI EXTRÉMNÍCH POVODŇOVÝCH STAVECH
CONTROLLABILITY ASSESSMENT OF THE ROUDNICE NAD LABEM SECTOR
WEIR BOX AT EXTREME FLOODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Patrik Růžek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN ŠULC, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Patrik Růžek
Název	Posouzení ovladatelnosti sektoru jezového pole VD Roudnice nad Labem při extrémních povodňových stavech
Vedoucí práce	prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017
V Brně dne 31. 3. 2016	

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Boor, B.; Kunštátský, J.; Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968

Bubeník, M.: Poškození konstrukce sektoru pravého jezového pole v Roudnici nad Labem. Technická zpráva, VD-TBD a. s., 2013

Čihák, F.: Posouzení funkce sektorového jezu v Roudnici nad Labem. Posudek, 4/2005

Průcha, M.: Ocelové konstrukce vodních staveb. Skriptum, ES ČVUT v Praze, 1982

Šulc, J.: Posouzení manipulovatelnosti polem sektorového jezu Roudnice. Posudek, ÚVS FAST VUT v Brně, 2014

Časový záznam úrovní hladin v horní a dolní zdrži a poloh sektorů VD Roudnice z let 2012 a 2013. Soubor Excel, záznam Dispečinku Povodí Labe, s. p.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Provést rozbor zatěžovacích sil a momentů působících na sektorovou konstrukci jezu Roudnice nad Labem při úrovních hladin v nadjezí a podjezí za extrémních povodňových stavů. Vypočítat dílčí momenty od všech působících sil a moment celkový vzhledem k ose otáčení sektoru. Při řešení uvažovat propojení tlakové komory sektoru s prostorem horní nebo dolní zdrže. Úroveň hladiny horní a dolní vody bude převzata ze zaznamenaného časového záznamu z června 2013. Pro kalibraci i verifikaci využít data z fyzikálního modelování proudových poměrů na ČVUT v Praze v roce 1968. Úlohu řešit jako rovinný problém.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT A KLÍČOVÁ SLOVA

Tato práce se zabývá stanovením zatěžovacích momentů při povodňových stavech na hydrostatickém sektorovém jezu v Roudnici nad Labem. Problematika se řeší z důvodu vyskytlé závady při sklápění sektoru. Cílem této práce je určit výsledné zatěžovací momenty tří vybraných stavů, které se vyskytly na vodním díle. Problematika se řešila jako rovinný 2D problém, za pomoci AutoCADu byla získána další potřebná data. Dále bylo využito softwaru ANSYS, kterým se modelovalo proudění vody přes jez, aby se zjistily tlaky, působící na přelivný líc. Veškeré výpočty se pak počítaly v programu Microsoft Excel. Silová bilance je provedena na jeden metr konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Hydrostatický jez, otáčivý moment, hydrostatika, hydrodynamika, metoda konečných prvků, matematické modelování

ABSTRACT AND KEY WORDS

This thesis deals with the determination of the load torque during flood conditions on the hydrostatic sectoral weir in Roudnice nad Labem. Problems are solved due to a glitch in the lowering sector. The aim of this study is to determine the resulting torque, of three selected states, which occurred at the water works. The issue was solved as a plane 2D problem using AutoCAD, in which were read the relevant data. It was also used ANSYS software, which modeled the flow of water over the weir to detect pressures acting on overflow face. All calculations are then counted in Microsoft Excel. Force balance is performed on the one-meter design.

KEYWORDS

Hydrostatic weir, torque, hydrostatics, hydrodynamics, finite element method, mathematical modeling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Patrik Růžek *Posouzení ovladatelnosti sektoru jezového pole VD Roudnice nad Labem při extrémních povodňových stavech*. Brno, 2017. 80 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Patrik Růžek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Janu Šulcovi, CSc. za jeho odborné vedení, věcné připomínky a výstižné rady při vytváření této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Duchanovi, Ph.D. za pomoc a vedení při práci se softwarem ANSYS. V poslední řadě bych chtěl poděkovat svému spolubydlícímu Janu Šnajderovi, který mi vnuknul myšlenku, díky níž jsem byl schopen vyhodnotit výsledky.

1	CÍL PRÁCE	11
2	SEKTOROVÝ JEZ ROUDNICE	12
2.1	HISTORIE VODNÍHO DÍLA	12
2.2	POPIS VODNÍHO DÍLA	13
2.2.1	HYDROLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA JEZOVÉHO PROFILU	13
2.2.2	ÚČEL VODNÍHO DÍLA	13
2.2.3	ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY VODNÍHO DÍLA	14
	Jez	14
	Provizorní hrazení	14
	Charakteristika jezové zdrže	14
2.2.4	JEDNOTLIVÉ SOUČÁSTÍ VZOUVACÍHO OBJEKTU	14
	Spodní stavba	14
	Hradicí konstrukce	15
	Jezový velín	15
	Bývalá vorová propust	15
	Rybí přechod	16
	Pavební zařízení	16
3	POPIS FUNKCE SEKTORU	18
4	POPIS PORUCHY NA VD ROUDNICE NAD LABEM..... CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.	
4.1	ZJIŠTĚNÍ ZÁVADY	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
4.2	MANIPULACE SE SEKTOROVÝMI UZÁVĚRY PŘI PŘEVÁDĚNÍ VELKÝCH VOD CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.	
4.3	DALŠÍ FAKTA VSUPUJÍCÍ DO ÚVAHY	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
4.3.1	NEROVNOMĚRNÁ DEFORMACE PATEK	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
4.3.2	VZDUCH UVNITŘ SEKTORU	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
4.3.3	PŘÍČINA HAVÁRIE	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
5	ZÁKLADNÍ ROVNICE MECHANIKY KAPALIN	21
	Zákon zachování hmotnosti – rovnice kontinuity	21
	Zákon zachování hybnosti – rovnice hybnosti	22
	Konstitutivní vztahy	22
	Navier-Stokesovy rovnice a Eulerovy rovnice	23
	Zákon zachování energie	23
6	PŘEHLED NUMERICKÝCH METOD	24
6.1	METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ	24
6.2	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	27
6.2.1	VZNIK A VÝVOJ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ	27

6.2.2	KLASIFIKACE PROSTŘEDÍ A POSTUPŮ MKP	28
6.2.3	MKP A MODELOVÁNÍ	29
	Modelování	29
	Mechanické modely	30
	Modely hydrodynamických jevů	31
	Postup při výběru vhodného matematického modelu pro řešení úloh vodního hospodářství ..	33
	Příme a inverzní modelování	33
6.2.4	MÝTY A POVĚRY O MKP	34
6.2.5	POSTUP PŘI TVORBĚ MATEMATICKÉHO A NUMERICKÉHO MODELU	34
	Zákony zachování, stavové rovnice, okrajové a počáteční podmínky	35
	Zjednodušující předpoklady	36
7	POSTUP VÝPOČTU	39
7.1	PŘÍPRAVA DAT	39
7.2	MESHOVÁNÍ	42
7.3	OKRAJOVÉ A POČÁTEČNÍ PODMÍNKY	45
7.4	VÝPOČET	47
7.5	VYHODNOCENÍ VÝSTUPŮ	48
8	POUŽITÁ METODIKA VÝPOČTU CELKOVÉHO MOMENTU	55
8.1	MOMENTY VYVOLANÉ HYDRODYNAMICKÝM ÚČINKEM PŘEPADAJÍCÍ VODY PŘES VZDUŠNÍ LÍČ JEZU	56
8.2	MOMENTY VYVOLANÉ HYDROSTATICKÝM ÚČINKEM VODY PŘI PROPJENÍ TLAKOVÉ KOMORY S PROSTOREM HORNÍ NEBO DOLNÍ ZDRŽE	58
	61
8.3	MOMENTY VYVOLANÉ VLASTNÍ TÍHOU KONSTRUKCE	62
8.4	MOMENTY VYVOLANÉ VZTLAKOVOU SÍLOU	63
	66
8.5	CELKOVÝ MOMENT	66
9	VÝSTUPY Z MODELU A JEJICH POROVNÁNÍ	67
10	ZÁVĚR	70
11	POUŽITÁ LITERATURA	71
	SEZNAM TABULEK	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	75

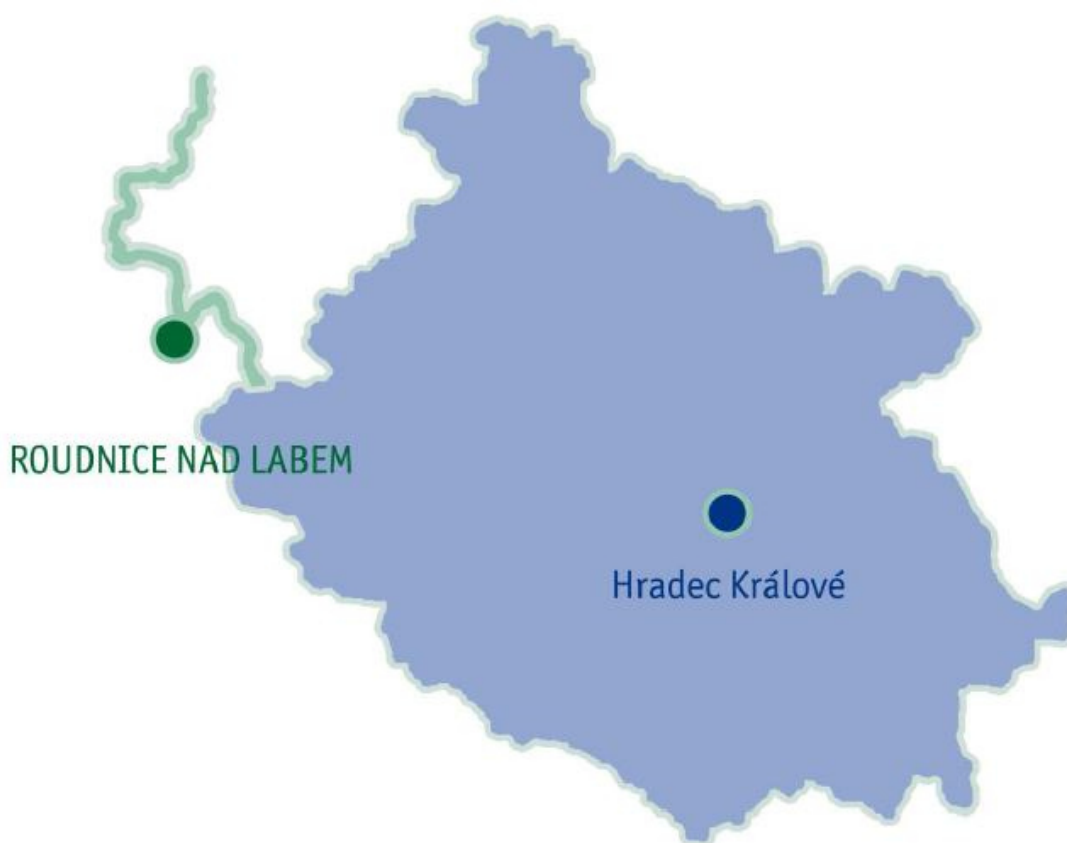
1 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je posoudit ovladatelnost jezového pole VD Roudnice nad Labem při povodňových stavech. Neboť se jedná o jez hydrostaticky ovládaný (za použití přepouštění vody do tlačné komory uvnitř spodní stavby jezu), je nutné u něj zjistit výsledný celkový moment otáčení, který vzniká vlivem působení okolí. Jedná se o momenty vyvolané: vlastní tíhou sektoru, hydrostatickým účinkem vody při propojení tlakové komory s prostorem horní nebo dolní zdrže, hydrodynamickým účinkem přepadající vody přes vzdušní líc jezu a vztlakovou silou. Pro všechny dílčí momenty je potřeba určit velikost jednotlivých složek zatížení. Data potřebná k určení hydrodynamické složky jsou k dispozici ale pouze pro stavy při úrovních hladin horní a dolní vody, které byly použity při modelovém výzkumu uskutečněném na katedře hydrotechniky ČVUT v Praze roku 1968 [6]. Polohy hladin použity při modelovém výzkumu ovšem nedosahují hodnot naměřených při povodňových stavech. Při výzkumu prováděném pro základní zatěžovací stav, byla uvažována hladina horní vody odpovídající maximální hradící úrovni sektoru. Tato úroveň bývá pro tento typ konstrukce uvažována zpravidla nominální hladinou v souladu s manipulačním řádem daného vodního díla (VD). Proto je vhodné vytvořit matematický model jezu a hodnoty hydrodynamického účinku pro povodňové stavy vyčíst z jeho výsledků. Jako kontrola funkčnosti modelu (či případná kalibrace), nám poslouží výstupy z modelového výzkumu, kdy se budou v nově vytvořeném modelu simulovat stavy použité v roce 1968.

2 SEKTOROVÝ JEZ ROUDNICE

2.1 HISTORIE VODNÍHO DÍLA

Zdymadlo Roudnice nad Labem se nachází na řece Labe v ř. km 809,729 a bylo vybudováno v rámci výstavby vodní cesty na Vltavě a Labi na začátku 20. století. Samotná výstavba, tehdy ještě hradlového jezu, probíhala v letech 1906–1910. Stavba byla umístěna pod příhradovým ocelovým mostem. Jez byl rozdělen na tři jezová pole. Toto rozdělení se zachovalo i po jeho rekonstrukci v 60. letech 20. století, kdy se hradlové hrazení, které bylo z hlediska ruční manipulace velmi náročné a nebezpečné, nahradilo jezem hydrostaticky sektorovým. Hlavní důvod rekonstrukce byl, aby došlo k zajištění splavnosti řeky v zimním období a při velkých vodách. Rekonstrukce a modernizace probíhala v letech 1967–1972. Plavební zařízení, vybudované v letech 1908–1910, prošly postupně také rekonstrukcí. Malá plavební komora byla celkově rekonstruovaná v letech 1974–1975 na užitnou délku 85 m, což je navýšení o 12 m z původních 74. Do horního ohlaví byla osazena klapková vrata. Velká plavební komora byla rekonstruována v letech 2001–2003. Její délka se ze 146 m navýšila na celkovou užitnou délku 155 m. Oboje ohlaví byly pak rozšířeny z 11 m na 22 m [1].



Obr. 2.1 Poloha jezu na Labi [1]

2.2 POPIS VODNÍHO DÍLA

2.2.1 Hydrologická charakteristika jezového profilu

Plocha povodí	42 357 km ²
Průměrný průtok	252,7 m ³ ·s ⁻¹
Stoletý průtok Q ₁₀₀	4 083 m ³ ·s ⁻¹
Maximální průtok srpen 2002	5 050 m ³ ·s ⁻¹

2.2.2 Účel vodního díla

- Dopravní – zajištění potřebných hloubek a vyhovujících podmínek pro plavbu ve zdrži
- Hospodářský – odběry povrchové vody z jezové zdrže
- Rekreační – využití zdrže a vorové propusti pro vodní sporty; rekreační rybolov

2.2.3 Základní technické parametry vodního díla

Jez

Počet polí	3
Světlá šířka jezových polí	54,05 m
Šířka betonových dělicích pilířů	3,45 m
Max. konstrukčně možná hrazená výška	2,70 m
Současná hrazená výška	2,40 m
Hradicí konstrukce	hydrostatický sektorový uzávěr
Umístění hlavní strojovny	v levém pilíři pod jez. velínem

Provizorní hrazení

Provizorní hrazení jezu proti horní i dolní vodě se sestává z vyjímatelných slupic a ocelových stavidlových desek o rozměrech (3,86 x 1,9) m, které se zasunují mezi slupice. K osazení je nutná plovoucí mechanizace.

Charakteristika jezové zdrže

Celkový objem	4,21 mil. m ³
Kóta hladiny horní vody	149,59 m n. m. Bpv
Povolená tolerance kolísání vody	-20 cm až + 15 cm
Kóta hladiny dolní vody	146,59 m n. m. Bpv (vzdutí VD České Kopisty)
Délka vzdutí	9,245 km

2.2.4 Jednotlivé součásti vzouvacího objektu

Spodní stavba

Spodní stavba je železobetonová a vytváří se sklopeným sektorovým uzávěrem Jamborův práh, který při vysokých průtocích vyvozuje minimální vzdutí. Spodní stavba vystupuje nad dno o 0,5 m, na vzdušné straně je šikmý líc ukončen rozrážecí. Na betonovou konstrukci v podjezí navazuje opevnění dna koryta kamenným záhozem. Uvnitř spodní stavby jsou tlačné komory pod jednotlivými uzávěry a komunikační štola o rozměrech (2,0 x 2,0) m, která umožňuje vstup do všech pilířů a po zaaretování sektorů a vyčerpání vody také do tlačných komor. Štolou

prochází hydraulická a elektrická instalace jezu, sběrný žlab prosáklé vody a je zde instalováno měřicí zařízení pro sledování deformací spodní stavby jezu [1].

Hradicí konstrukce

Hradicí konstrukce je ocelová, svařovaná o projektované hmotnosti každého sektoru 79 tun. Těleso sektoru má průřez vypouklého trojúhelníku a ze dvou stran je opatřeno plechovou obšívku, která vytváří jeho hybné stěny s funkcí hradicí a přelivné plochy. Pod přelivnou plochou je uzávěr přes šest hlavních kluzných ložisek připojen k betonům spodní stavby. Dolní otevřená strana sektoru umožňuje hydrostatické síle, odpovídající výšce hladiny nad jezem, působit z tlačné

komory na jeho pohyblivé stěny. Změnou těchto sil pak lze s tímto mohutným tělesem pohybovat. Hlavní ložiska dovolují sektoru otáčení – směrem vzhůru, pokud je pod sektor napuštěna voda ze vzduté hladiny nad jezem, nebo naopak směrem dolů, pokud je z místa pod sektorem voda vypouštěna do dolní vody pod jez. Regulaci přítoku vody pod sektor nebo odtoku z místa pod ním, zajišťuje trojcestný válcový ventil. Ovládání trojcestného ventilu je automatické ve vazbě na úroveň hladiny vody v nadjezí a na polohu přelivné hrany sektoru. Lze ho však ovládat i manuálně podle potřeb provozovatele. Přesnost dodržení hladiny je v centimetrech. Těleso sektoru je těsněno tvarovými pryžovými profily. Pro zajištění zimního provozu jsou boční štíty hradicí konstrukce každého pole vyhřívány. V současné době však konstrukce nedokáže dokonale zajíždět do spodní stavby, a tudíž vyčnívající konstrukce narušuje konturu Jamborova prahu. Tato skutečnost je zapříčiněna navýšením dosedacích stoliček o 0,4 m z důvodu naplavenin [1], [5].

Jezový velín

Jezový velín je umístěn na dělicí zdi mezi horním plavebním kanálem a jezem. Z něho je přístup do komunikační štol ve spodní stavbě jezu. V manipulační místnosti velínu jsou umístěna potřebná zařízení pro automatické ovládání uzávěrů a je odtud možná i kontrola všech funkcí jezu [1].

Bývalá vorová propust

Bývalá vorová propust je umístěna u pravého břehu a svojí horní částí navazuje na jez. Je dlouhá 220 m a široká 12 m se stupňovitým dnem. Z horní vody ji lze zahradit gumovým vakem plněným vodou. Provizorní zahrazení se provádí dřevěnými hradly opřenými o vodorovný

nosník. Začátkem 20. století sloužila tato propust pro splavování vorů přes jez. Od 60. let 20. století je v propusti instalována umělá slalomová dráha provozovaná Kanoistickým klubem Roudnice nad Labem [1].

Rybí přechod

Rybí přechod je umístěn v dělicí zdi u vtoku do horního plavebního kanálu a obchází levý břehový pilíř mostu. Je komůrkový, dlouhý 40 m, široký 1,5 m a dvakrát směrově zalomený.

Plavební zařízení

Plavební zařízení je situováno u levého břehu a zahrnuje dvě plavební komory (malou a velkou), horní a dolní plavební kanál s rejdkami a čekací stání. Dvě komory jsou umístěny vedle sebe ve vzdálenosti 900 m od osy jezu směrem po vodě. Od vlastního řečiště je odděleno umělým ostrovem dlouhým 1,7 km a širokým až 180 m.

- **Malá plavební komora** má užitnou délku 85 m a šířku 11 m. Minimální hloubka vody nad oběma záporníky je 2,7 m. Běžný spád komory je 2,9 m. Horní vrata tvoří ocelová klapka s jednostranným hydraulickým pohonem. Dolní vrata jsou standardní vzpěrná rovněž s hydraulickým pohonem. Plnění je kombinované, a to dlouhými obtoky přes segmentové uzávěry a přímé, přepadem přes klapku; prázdnění pak dlouhými obtoky. Provizorní zahrazení komory se provádí válcovými ocelovými hradidly do drážek v ohlaviích plavební komory. V obou ohlaviích komory lze instalovat unifikovaná náhradní vrata.
- **Velká plavební komora** má užitnou délku 155 m a šířku 22 m. Minimální hloubka vody nad horním záporníkem je 3,3 m, nad dolním záporníkem 3,0 m. Běžný spád komory je 2,9 m. Horní i dolní vrata jsou vzpěrná, oboje s hydraulickým pohonem. Dolní vrata jsou z horní vody chráněna hydraulicky ovládanou lanovou dynamickou ochranou. Plnění a prázdnění komory je dlouhými obtoky přes segmentové uzávěry. Provizorní hrazení komory se provádí ocelovými stavidlovými deskami, osazovanými plovoucí mechanizací mezi slupice.
- **Velín plavebních komor** je společný pro obě plavební komory a je umístěn na dělicí zdi mezi nimi. Proplavování je prováděno v poloautomatickém režimu, ale lze ho řídit též manuálně z obou ohlaví. Velín je moderní konstrukce, klimatizovaný, vybavený technologií pro sledování, měření a vyhodnocení dat z plavební komory a jezu, která

jsou současně přenášena přes uzlový bod do vodohospodářského dispečinku Povodí Labe, státní podnik Hradec Králové.

- **Horní plavební kanál** je dlouhý 1040 m, ve dně široký minimálně 24 m a hluboký nejméně 3,1 m. Pro zlepšení hydraulických poměrů v dlouhém plavebním kanále je téměř v celé délce provedena úprava břehů svislou Larsenovou stěnou. Při levém břehu kanálu před komorami je veřejné přístaviště pro osobní lodi a stání pro malá plavidla čekající na proplavení a polohy pro plavidla správce vodní cesty.
- **Dolní plavební kanál** je dlouhý 500 m, ve dně široký minimálně 26 m a hluboký nejméně 3,1 m. V dolní části byla provedena korekce pravého břehu směrem do ostrova a vytvořeno stání pro nákladní plavidla čekající na proplavení. Při levém břehu u malé plavební komory je stání pro malá plavidla [1].



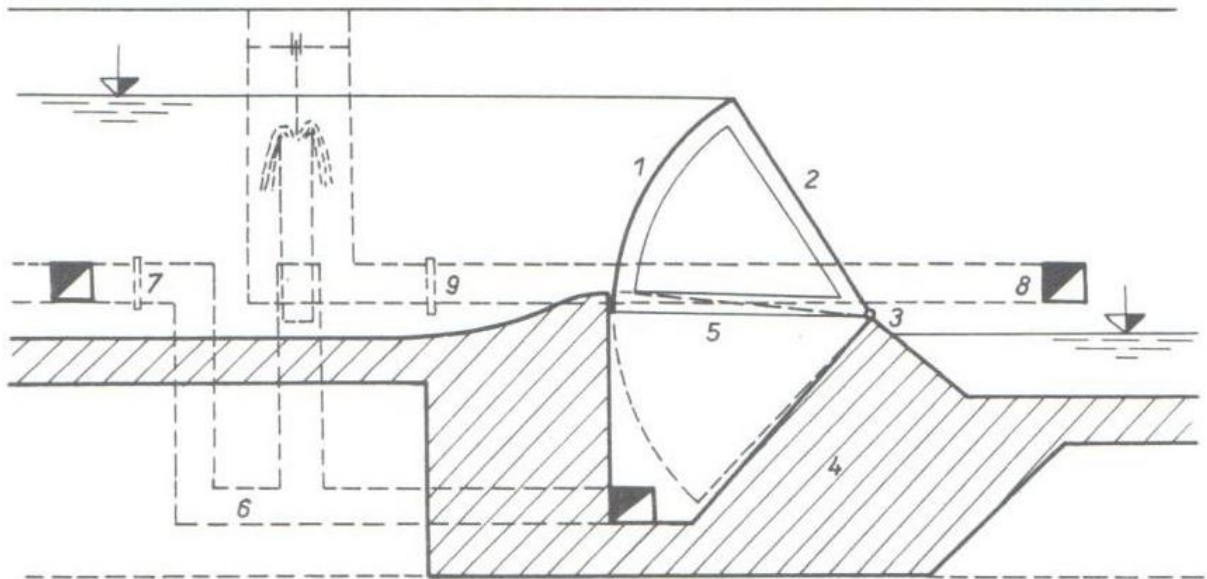
Obr. 2.2 Letecký snímek zdymadla v Roudnici nad Labem [1]

3 POPIS FUNKCE SEKTORU

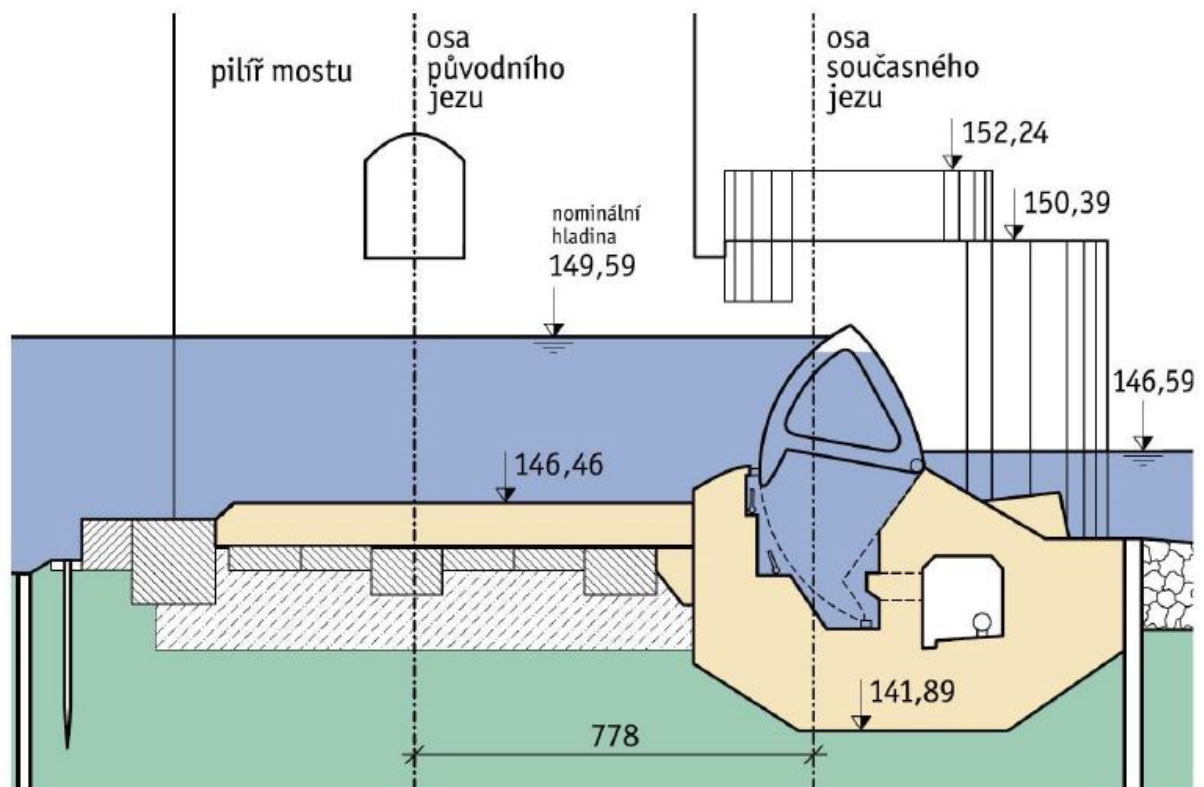
Těleso sektoru má průřez vypouklého trojúhelníku a ze dvou stran je opatřeno plechovou obšívku, která vytváří jeho hybné stěny s funkcí hradicí a přelivné plochy (viz 1 a 2 obr 3.1) . Pod přelivnou plochou je uzávěr přes šest hlavních kluzných ložisek připojen k betonu spodní stavby. Dolní otevřená strana sektoru umožňuje hydrostatické síle, odpovídající výšce hladiny nad jezem, působit z tlačné komory na jeho pohyblivé stěny. Změnou těchto sil pak lze s tímto mohutným tělesem pohybovat. Hlavní ložiska (3 obr. 3.1) dovolují sektoru otáčení (směrem vzhůru, pokud je pod sektor napuštěna voda ze vzduté hladiny nad jezem nebo naopak směrem dolů, pokud je z pod sektoru voda vypouštěna do dolní vody pod jez). Regulaci přítoku vody pod sektor nebo odtoku z pod něho, zajišťuje trojcestný ventil. Ovládání trojcestného ventilu je automatické ve vazbě na úroveň hladiny vody v nadjezí a na polohu přelivné hrany sektoru. Lze ho však ovládat i manuálně podle potřeb provozovatele. Přesnost dodržení hladiny je v centimetrech. Těleso sektoru je těsněno tvarovými pryžovými profily. Pro zajištění zimního provozu jsou boční štíty hradicí konstrukce každého pole vyhřívány.

Samotné sklápění se provádí vypouštěním vody z tlačné komory pomocí trojcestného ventilu, kdy je voda odváděna potrubím DN300 do spodní vody. Hlavní přívod vody do trojcestného ventilu se uzavře. Stejným postupem se sklápí střední pole a nakonec také levé pole. Jsou-li všechna pole sklopena, uzavře se ventilem o světlosti DN500 hlavní přívod vody do samotného jezu. Zvedání jezu pak probíhá opačným způsobem.

Manipulace s trojcestným ventilem probíhá elektronickým řízením pomocí ovládacího softwaru v závislosti na hladinové regulaci [5].

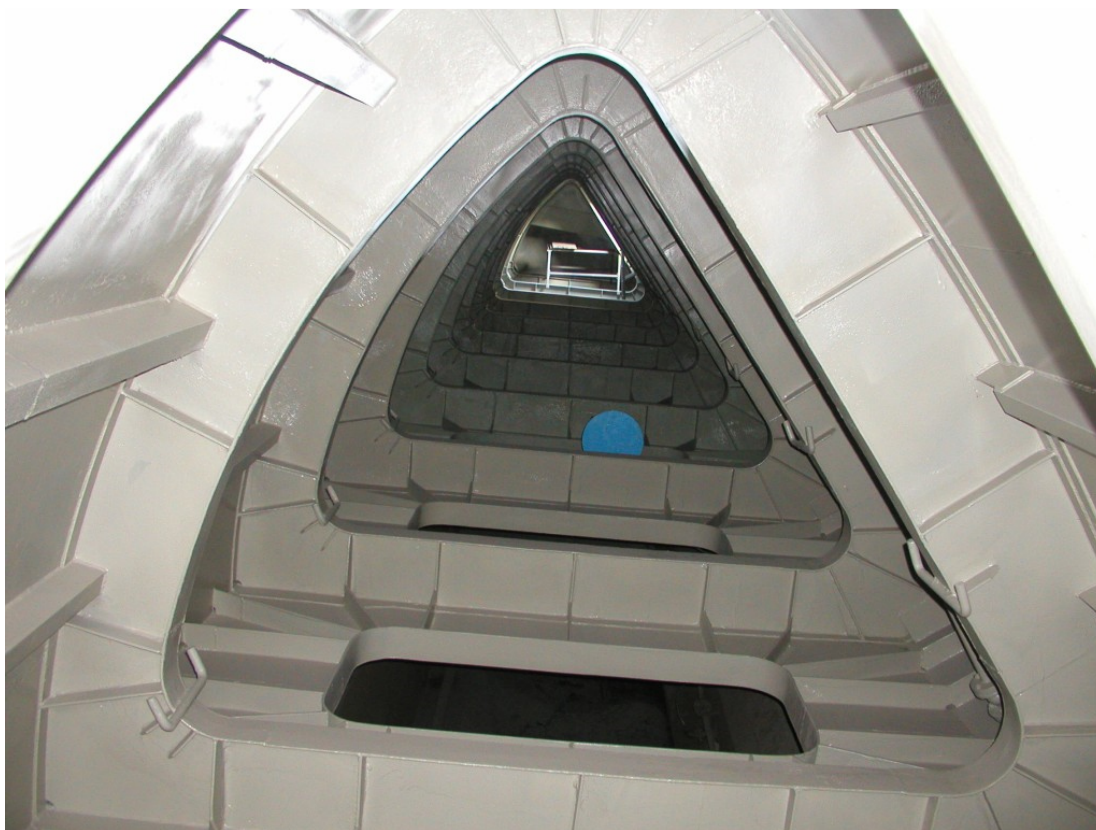


Obr. 3.1 Schéma sektorového hydrostatického jezu: 1-válcová stěna, 2-přelivná stěna, 3-ložiska otáčení, 4-spodní stavba, 5-tlačná komora, 6-propojení komory s horní zdrží, 7-uzávěr potrubí č. 6, 8-propojení komory s dolní vodou, 9-uzávěr potrubí č. 8 [2]



Obr. 3.2 Schématický řez jezovým polem [1]

Úkolem této práce je určit výsledný moment, který na jez působí při propojování tlačné komory s horní nebo dolní zdrží a posoudit, zdali bude možné s konstrukcí manipulovat (sklápět, vztýčovat) nebo zajistit požadovanou polohu bez aretace.



Obr. 3.3 Pohled do vnitřku sektoru



Obr. 3.4 Pohled do prostoru tlačné komory

4 ZÁKLADNÍ ROVNICE MECHANIKY KAPALIN

Jak se uvádí v kapitole 1, je potřeba zhotovit matematický model na kterém se budou modelovat stavy, u kterých došlo k poruše. Dřív než se ovšem začne se samotným modelováním, je třeba ujistit se, že zhotovený model počítá správně. K tomu budou sloužit kalibrační data, které se získají z fyzikálního modelového výzkumu. Porovnávat se budou celkem tři stavy. Poloha sektoru má označení 10 (viz. obr. 8.1) a u této polohy se budou porovnávat stavy 0,7H, 0,8H a 0,9H (obr. 9.1). Tyto stavy jsou vybrány, protože se nejvíce blíží stavům, u kterých došlo k samovolnému zvedání jezové konstrukce. Než se začne s výpočtem, je vhodné provést stručné seznámení s numerickou metodou popisující proudění v prostoru konstrukce shora ohraničující volnou hladinou a se základními rovnicemi mechaniky kapalin.

Mechanika kapalin se zabývá rovnováhou sil za klidu a pohybu kapaliny. Přitom nezkoumá pohyb molekul kapaliny, neboť to je předmětem kinetické teorie kapalin. Místo toho se zavádí pojem “elementární objem kapaliny“, což je objem velmi malý vzhledem k poměrům oblasti proudění, ale dostatečně velký vzhledem k délce volné dráhy molekul.

Zákon zachování hmotnosti – rovnice kontinuity

Principem kontinuity proudění je zákon zachování hmotnosti proudící kapaliny. Ze zákona zachování hmotnosti proudící kapaliny vyplývá, že rozdíl mezi hmotností kapaliny do elementu vtékající a z elementu vytékající za časový interval dt se musí rovnat časové změně hmotnosti kapaliny v tomto elementu obsažené. Zákon zachování hmotnosti je v hydraulice uváděný jako rovnice kontinuity [10].

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5.1)$$

Kde ρ ($\rho(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$) je hustota kapaliny, v_i jsou složky vektoru rychlosti v a $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ jsou prostorové souřadnice, které u pohybující se kapaliny jsou funkcí času t .

Zákon zachování hybnosti – rovnice hybnosti

Rovnice hybnosti má tvar [10]

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{Dv_i}{Dt} \quad (5.2)$$

Kde σ_{ij} je tenzor napětí, ρ je hustota kapaliny, $f_i(x, y, z, t)$ jsou složky objemového zatížení f vztaženého na jednotku hmotnosti, $v_i(x, y, z, t)$ jsou složky vektoru rychlosti v . Symbol $\frac{D}{Dt}$ značí Lagrangeovskou úplnou (substanciální) derivaci.

Konstitutivní vztahy

Konstitutivní vztah vyjadřuje závislost mezi tenzorem napětí σ_{ij} a tenzorem rychlosti přetvoření (deformační rychlosti) ε_{ij} . Pro newtonovskou kapalinu konstitutivní vztah vyjadřují napětí σ_{ij} v kapalině jako lineární funkci rychlosti přetvoření ε_{ij} a tlaku p [10].

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda(\rho, T)\varepsilon_v + 2\mu(\rho, T)\varepsilon_{ij} \quad (5.3)$$

Kde $p(x, y, z, t)$ je tlak, ε_v tenzor rychlosti objemového přetvoření, $\lambda(\rho, T)$ koeficient objemového přetvoření, $\mu(\rho, T)$ koeficient dynamické viskozity (λ, μ jsou koeficienty charakterizující kapalinu), δ_{ij} Kroneckerovo delta. Tenzor rychlosti přetvoření ε_{ij} je vyjádřen jako lineární kombinace prvních parciálních derivací složek vektoru rychlosti v_i .

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.4)$$

Tenzor rychlosti objemového přetvoření je definován:

$$\varepsilon_v = \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \quad (5.5)$$

Zanedbáním vlivu objemového přetvoření (objemově stála kapalina), nabude (5.3) často užívaného tvaru:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu(\rho, T)\varepsilon_{ij} \quad (5.6)$$

Navier-Stokesovy rovnice a Eulerovy rovnice

Diferenciální rovnice Navier-Stokesovy jsou nejobecnější rovnice pohybu vazké nestlačitelné tekutiny. Navier-Stokesovy rovnice se obdrží dosazením konstitutivních vztahů do rovnice hybnosti.

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (5.7)$$

Kde $f_i(x, y, z, t)$ jsou složky vektoru objemového zatížení f vztaženého na jednotku hmotnosti, $v_i(x, y, z, t)$ složky vektoru rychlosti v , $p(x, y, z)$ je tlak, ρ hustota kapaliny a μ koeficient dynamické viskozity.

Tyto rovnice odvodil Claude Louis Marie Henri Navier roku 1821 a George Gabriel Stokes roku 1845. Navier-Stokesovy rovnice vyjadřují pro jednotku hmotnosti protékající částice kapaliny vztah mezi silami:

- objemovými obecného silového pole, kde působí na každý hmotný bod v daném objemu, a jsou proto úměrné hmotnosti kapaliny (např. odstředivá síla, tíha kapaliny);
- tlakovými, zvětšenými o příslušné složky z vazkosti kapaliny;
- a setrvačnými.

Uvažuje-li se ideální kapalina definovaná jako nestlačitelná, objemově stálá při změnách teploty a nevazká, takže v ní nepůsobí smyková napětí, tj. $\mu = 0$ Pa·s, nabudou Navier-Stokesovy rovnice tvaru:

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (5.8)$$

Zákon zachování energie

Pro účely modelování neizotermických dějů uvedeme rovnici zachování energie.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + v_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \lambda \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i^2} + S_\Phi \quad (5.9)$$

Kde Φ představuje energii (tepelná T , turbulentní k , ...) λ je difuze, S_Φ objemový zdroj [12], [13], [14].

5 PŘEHLED NUMERICKÝCH METOD

V úlohách hydrodynamiky se osvědčily zejména metoda konečných prvků (MKP) a metoda konečných diferencí (MKD).

5.1 METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ

Považuje se za nejstarší numerickou metodu, a to i díky tomu, že našla uplatnění ještě před zavedením výkonných počítačů. V posledních letech je však nahrazována různými jinými metodami, zejména pak metodou konečných prvků, ale stále se používá díky své jednoduchosti.

Princip MKD spočívá v nahrazení parciálních derivací vyskytujících se v základních řídicích rovnicích algebraickými výrazy vyjadřujícími podíl konečných diferencí závislé a nezávislé proměnné. Jako příklad můžeme uvést aplikaci MKD při časové a prostorové diskretizaci rovnice proudění podzemní vody. Jedná se o případ 2D horizontálního, nestacionárního a tlakového proudění v homogenní, anizotropní zvodní [9], [13].

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{S_p}{h} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6.1)$$

S okrajovými podmínkami:

$$H(t)| = \bar{H}(t), t > 0 \quad (6.2)$$

$$k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \cdot n_x + k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \cdot n_y = 0 \quad \text{na } \Gamma_2 \quad (6.3)$$

A počátečními podmínkami

$$H(x, y, 0) = H_0(x, y) \quad \text{v } \Omega \text{ v čase } t = 0 \quad (6.4)$$

Kde

h	je mocnost zvodněné vrstvy [m],
$H(x, y, t)$	je piezometrická výška [m],
$\bar{H}(t)$	je předepsaná piezometrická výška na části hranice Γ_1 [m],
$H(x, y, 0)$	je piezometrická výška v čase $t = 0$ na náhradní oblasti Ω [m],
k_x, k_y	jsou koeficienty hydraulické vodivosti ve směru os x a y [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
n_x, n_y	jsou směrové kosiny vnější normály k Γ_2 ,
S_p	je koeficient pružné zásobnosti (storativity),
t	je čas [s]
x, y	prostorové proměnné [m],

- Γ_1 je část hranice oblasti se zadanou hodnotou piezometrické výšky,
 Γ_2 je nepropustná hranice,
 Ω je oblast řešení.

K přibližnému řešení rovnice se použije metoda konečných diferencí s pravoúhlou sítí a se shodným krokem Δx a Δy (viz obr 6.1). Podstata této metody spočívá v tom, že se operátory parciálních derivací nahradí diferenčními operátory a celá úloha se převede na soustavu lineárních algebraických rovnic pro jednotlivé body na časové ose. Parciální derivace ve směrech os x a y z rovnice (6.1) je pak možné vyjádřit jako:

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} \approx \frac{H_{i+1,j} + H_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial y} \approx \frac{H_{i,j+1} + H_{i,j-1}}{2\Delta y} \quad (6.6)$$

a

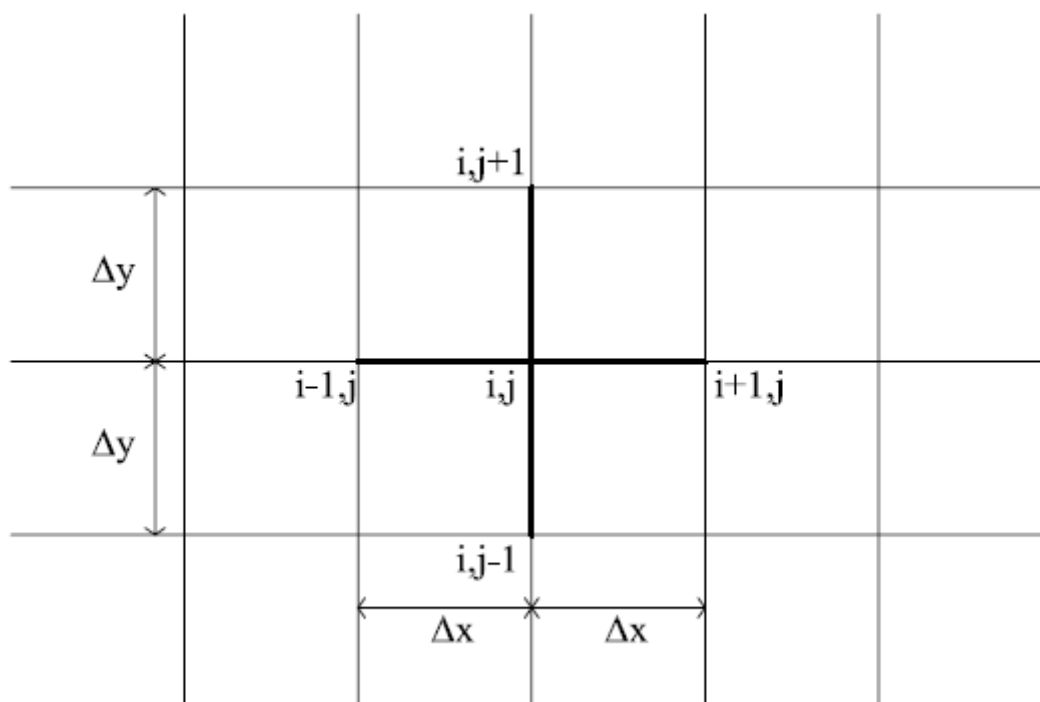
$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \approx \frac{H_{i+1,j} - 2 \cdot H_{i,j} + H_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \approx \frac{H_{i,j+1} - 2 \cdot H_{i,j} + H_{i,j-1}}{\Delta y^2} \quad (6.8)$$

Derivaci času, která se vyskytuje na pravé straně rovnice 6.1, se pomocí konečných diferencí zapíše následovně:

$$\frac{S}{h} \cdot \frac{\partial H_{i,j}}{\partial t} \approx \frac{S}{h} \cdot \frac{H_{i,j}(t + \Delta t) - H_{i,j}(t)}{\Delta t} \quad (6.1)$$

[9], [13].



Obr. 5.1 Pravoúhlá síť

5.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

V této kapitole jsem čerpal poznatky z knih: Metoda konečných prvků [12], Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů [13] a Úvod do metody konečných prvků [14].

5.2.1 Vznik a vývoj metody konečných prvků

Metoda konečných prvků je univerzální metoda pro řešení jakékoliv konstrukce. Vznikla a dále se rozvíjela v letech 1956–1966, kdy začala nahrazovat do té doby používané postupy výpočtu stěn, desek, skořepin a těles. Byla to různá řešení řadami, variační metody a zejména metoda sítí, poměrně nejobecnější a metodě konečných prvků zdánlivě nejbližší. Metoda sítí, pro svou čistě matematickou povahu, byla velmi vzdálena konstrukčnímu pojetí. Neumí dobře vystihnout mnohé konkrétní okrajové a kontaktní podmínky, selhává u složitějších úloh s kombinací různých druhů prvků, neexistuje praktický odhad chyb řešení atd. Konstrukce z různorodých prvků, nehomogenní, z nepružného materiálu a podobně nelze řešit metodou sítí. Proto byla metoda sítí postupně nahrazována metodou konečných prvků.

Metodou konečných prvků lze řešit tyto prakticky závažné úkoly:

- Prostorové konstrukce: přehrady, základové bloky, části strojů...
- Konstrukce složené z plošných prvků v prostoru: panelové a krabicové konstrukce, základové skříně, komůrkové mostní nosníky, síla, křídla a trupy letadel...
- Libovolné desky: izotropní i anizotropní, s malými i velkými deformacemi, z libovolného materiálu, proměnné tloušťky, s otvory...
- Všechny rovinné konstrukce: nosné stěny, kotouče, disky, prismatické zatížení dlouhých bloků nebo poloprostoru (u přehrad aj.), koncentrace napětí v rovinných částech strojů s otvory, zářezy...
- Libovolné kontaktní úlohy u konstrukcí složených z různorodých prvků: desek, stěn, nosníků a sloupů, spojení s poddajným základem, skořepiny s obrubními nosníky...
- Kromě statických úloh lze řešit i úlohy dynamické, stabilní a reologické, tj. otázky resonance a vzpěrné pevnosti, postkritické únosnosti, dotvarování, relaxace a jiné nelineární úlohy
- Konstrukce složené pouze z jednorozměrných prvků

V porovnání s metodou sítí dává metoda konečných prvků lepší výsledky při jinak stejných podmínkách dělení, či počtu neznámých.

V hydrodynamice je nejdůležitější výpočet polí stavových veličin. Jedná se o pole tlaková, rychlostní, teplotní, případně pole z nich odvozených veličin, kinetické energie, její disipace, smykových napětí, hodnoty Reynoldsových napětí a Machových kritérií nebo turbulentní vazkosti. V případě hydrodynamiky proudění v horninovém prostředí se jedná o pole piezometrických výšek a specifického průtoku, a při řešení úloh transportu a disperze látek se jedná o pole koncentraci sledovaných látek a hmotnostních průtoků. Takto vypočtené veličiny mají pak velký význam při projektování a provozu vodohospodářských staveb, při posuzování vydatnosti vodních zdrojů a jejich kvality.

Velké procento konkrétních praktických příkladů je nemožné řešit analyticky, a to i za cenu velkého zjednodušení. Právě v těchto případech se dnes s velkou výhodou používá numerických metod. V nedávné minulosti by to byl dozajista problém, neboť bez potřebného početního výkonu by trval výpočet velmi dlouho (týdny), ale díky dnešní moderní technice se jedná řádově o dny (hodiny, v závislosti na velikosti řešené oblasti a jemnosti meshování).

Metodu konečných prvků, ve své nejjednodušší podobě, poprvé načrtl Courant Richard ve své práci: *Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations* (1943). První kniha věnována pouze metodě konečných prvků (*The Finite Method in Structural and Continuum Mechanics*) byla vydána roku 1967, jejíž autor byl Olgierd Cecil Zienkiewicz. V 15 kapitolách, které byly účelně rozděleny podle témat, a na 270 stránkách poskytl velmi dobré informace pro studenty i inženýry s množstvím literárních citací. Vzhledem k účelu, k jakému byla napsána, se jednalo spíše o knihu popisující problematiku do šířky než do hloubky. Autor se dále zabýval problematikou do hloubky ve svých pozdějších pracích.

U nás se jako první o metodu konečných prvků v oblasti proudění kapalin a stability přehrad zajímal prof. Ing. Jiří Kratochvíl, DrSc., který se o metodě dozvěděl z amerických inženýrských časopisů v roce 1965. Během následujících dvou let pak vytvořil program pro statické výpočty přehrad [12], [13], [14].

5.2.2 Klasifikace prostředí a postupů MKP

V dnešní době, kdy máme mnoho softwarů používající metodu konečných prvků, si mnozí uživatelé myslí, že jim tento program spočte vždy správně úplně vše, co mu zadají. To je nebezpečná iluze. Pouze vlastní výpočet je matematickým strojem, který pracuje víceméně exaktně. Konstruktor, který by se snažil úlohu řešit v ruce, musí mít značné zkušenosti a cit. Něco obdobného platí i v případě řešení numerickou metodou. Tvorba matematických modelů

je náročná činnost, při které se výpočtář opírá v první řadě o názor, zkušenosti, intuici a cit [12], [13], [14].

5.2.3 MKP a modelování

Modelování

Matematik by modelování nazval zobrazení reálného systému na systém modelový a zpět. Reálným systémem se zde míní soubor vybraných reálných objektů a vazeb mezi nimi (zbytek světa se nazývá okolím, a to bývá obvykle popisováno pouze interakcemi se systémem), modelový systém je souborem modelových objektů a (modelových) vazeb. Cílem modelování je popsat nebo předpovědět vzájemné interakce objektů reálného systému, při působení okolí, prostřednictvím kování modelu. Modelové objekty mohou být obecně jak fyzické, tak abstraktní.

Fyzické modelové objekty a jejich interakce jsou totožné s reálnými. Pokud i interakce s okolím je autentická, hovoříme o zkoumání světa pozorováním. To je základní způsob poznávání a například v antice byl prakticky jediným. Jestliže systém vědomě podrobíme určitým vybraným vlivům okolí, popřípadě do něj implementujeme objekty, které neovlivní příliš jeho chování, ale zkvalitní pozorování, mluvíme o experimentu.

Modelové objekty jsou také fyzické, ale na rozdíl od výše zmíněných nejsou s totožné s reálnými. Tyto modely jsou postaveny na více či méně ověřených předpokladech a zjednodušeních. Jedná zejména pak o fyzikální a geometrickou podobnost se svým reálným objektem. Jako typický příklad můžeme uvést zmenšené modely, které se používají v laboratořích. Jako podkategorii zde můžeme uvést modely analogické, které využívají analogii mezi různými fyzikálními jevy. Např. proudění podzemní vody můžeme modelovat jako elektrický systém, kdy místo různých součinitelů hydraulické vodivosti používáme různé hodnoty elektrického odporu.

Abstraktní modely jsou výsledkem bádání některé obecné vědy, jako například: sociologie, fyzika či mechanika, kterou doplňuje matematika. Abstraktní modely mívají velmi univerzální charakter, a pokud jsou hodně obecné, tak je nazýváme teoriemi. Takové teorie nevycházejí z vnitřní podstaty reality, ale zaměřují se na určité důsledky jejich projevů. Proto je označujeme jako fenomenologie, u kterých je typické, že se nedokáží obejít bez velkého množství experimentálně naměřených dat při popisu okolního světa [12], [13], [14].

Mechanické modely

Ve stavebnictví a strojírenství mají velký význam modely mechanické. Abstraktní mechanické modely (dále už jen mechanické modely) vycházejí z fenomenologické teorie – klasické Newtonovské mechaniky. V souladu s klasickou mechanikou lze specifikovat obory modelování podle objektů:

- Modely soustav dokonale tuhých těles
- Modely soustav poddajných těles
 - pevné fáze
 - tekutin
- Modelování termomechanických jevů
- Modelování svázaných dějů (model poddajného tělesa zatěžovaného teplotním polem)
- Modelování kombinované

Dále lze modely dělit z hlediska časového průběhu jevů na:

- Modelování stacionárních dějů. Mechanické systémy podrobené časově neproměnlivým vlivům konvergují po nekonečně dlouhé době k neproměnlivému (ustálenému) stavu. Vzhledem k míře tlumení je v běžných systémech doba, po které je ustáleného stavu prakticky dosaženo, relativně krátká. Vzhledem k tomu, že se řada mechanických soustav nachází ve stavu statické rovnováhy, je úkolem stacionárních modelů popsat pouze tento výsledný (ustálený) stav bez ohledu na způsob jakým bylo tohoto stavu dosaženo.
- Modelování obecných nestacionárních mechanických dějů. Úkolem nestacionárních dějů je popsat závislost děje na čase, tedy pospat děj jako funkci času.

Dále lze modely dělit z hlediska pravděpodobností vstupů na:

- Modely deterministické, ve kterých je vztah mezi příčinou a následkem jednoznačný. Tedy, že každý vstup se realizuje s pravděpodobnostní hodnotou 1.
- Modely stochastické (pravděpodobnostní), podle nichž je každému možnému následku na danou příčinu přiřazovaná pravděpodobnostní hodnota menší než 1. Používají se s ohledem na nejistoty vstupů, jako jsou geometrické vlastnosti, popis materiálů a okrajové podmínky, které mohou být jiná než v reálu. Tím pádem se zde zpravidla dostáváme na stranu bezpečnou, což je ve stavebnictví běžná praxe.

Z hlediska účelů mohou být modely, respektive výpočty v technice klasifikovány jako:

- **Návrhové.** Tyto modely se používají k ověření navrhovaných vlastností a základních parametrů při návrhu konstrukce nebo technického díla. Tyto modely se velmi idealizují, tak aby bylo umožněno jejich analytické řešení, čímž se tvorba modelu zrychlí a klesne i jeho cena. Při počítačovém konstruování se dnes i v této oblasti prosazuje MKP.
- **Kontrolní.** Kontrolní modely se používají k ověření a průkazu funkčních parametrů konstrukce, jejíž návrh je už do značné míry zpracován. Mezi typické parametry patří: únosnost, životnost, deformace v provozních režimech. Limitní hodnoty těchto parametrů jsou většinou obsaženy v příslušných normách a určení jejich velikosti jsou nutnou podmínkou pro schválení provozu, či obdržení stavebního povolení. Abstraktní kontrolní modely jsou dnes nejčastěji založeny na MKP a často využívají specializovaný postprocessing (závěrečná fáze modelování, kdy už si uživatel softwaru určuje kvalitativní výstup výpočtu), který například na základě vypočtené závislosti zatížení-napjatosti dopočítá pro daný předpokládaný způsob zatěžování dobu do iniciace únavových trhlin.
- **Simulační.** Tyto modely se používají k popisu reálných provozních nebo havarijních situací v technickém díle. Cílem takovýchto modelů může být návrh, kontrola i poznání [12], [13], [14].

Modely hydrodynamických jevů

Metody pro řešení úloh hydrodynamiky lze rozdělit na:

Metody matematické, které vycházejí z matematické formulace proudění, můžeme je dále pak dělit na:

- Metody analytické, které mohou řešit jen malou část úloh hydrodynamiky.
- Metody přibližné, které jsou převážně numerické, zřídka graficko-početní. Tyto metody jsou v dnešní době používány pro řešení většiny úloh v hydrodynamice.

Metody experimentální, které vycházejí z poznatků teoretické a experimentální fyziky. Tyto metody lze dělit na:

- Metody přímé, které jsou založeny na sledování skutečného děje, ať už se jedná o prototyp, nebo o fyzikální model v jiném měřítku (zpravidla zmenšeném).

Hledané veličiny (tlak, rychlosti, pulzace, poloha hladiny apod.) se pak získají měřeními na modelu či prototypu. Přesnost, s jakou hledané veličiny naměříme, závisí na splnění podmínek modelové podobnosti.

- Metody nepřímé (analogické), které jsou založeny na formální shodnosti rovnic popisující dané jevy, a to i navzdory tomu, že patří do úplně jiného odvětví fyziky. Jako příklad můžeme uvést Laplacovu rovnici popisující potencionální proudění kapaliny, rozložení tepelného pole i rozložení elektrického potenciálu.

Matematické modely proudění tekutin lze rozdělit následovně:

- Podle hydraulického režimu proudění na modely:
 - Laminární
 - Turbulentní
- Podle časového režimu proudění na modely:
 - Stacionární, statické
 - Nestacionární, dynamické
- Podle prostorové dimenze na modely:
 - Jednorozměrné
 - Dvourozměrné
 - Trojrozměrné
- Podle charakteristik kapaliny na modely:
 - S homogenní nebo nehomogenní kapalinou
 - Se stlačitelnou nebo nestlačitelnou kapalinou
 - S newtonovskou nebo nenewtonovskou kapalinou
- Podle teplotních podmínek na modely:
 - Izotermické
 - Neizotermické
- Podle charakteristik horninového prostředí u modelů filtračního proudění na modely s:
 - Homogenním nebo nehomogenním prostředím
 - Izotropním nebo neizotropním prostředím
 - Deformujícím se nebo nedeformujícím se prostředím
- Podle povahy vstupních a hledaných veličin na modely:
 - Stochastické
 - Deterministické

- Podle účelu, kterému slouží na modely:
 - Simulační
 - Řídící
 - Optimalizační

Postup při výběru vhodného matematického modelu pro řešení úloh vodního hospodářství

Dříve než se řešitel pustí do výpočtu problematiky, je velmi důležité aby si zvolil vhodný matematický model. Při rozhodování by měl zohlednit tyto faktory:

1. Prvním a nejdůležitějším je definice cílů, kterých se má při modelování dosáhnout. S tím souvisí i určení požadované přesnosti výpočtu.
2. Dalším faktorem je podrobná analýza problému, z níž vyplynou nároky zajištění potřebného množství dat pro modelování. Dále je nutné vyhodnotit možnosti řešitele (technické, materiální a personální).
3. V závislosti na bod 2. je nutné zhodnotit finanční možnosti investora a časové nároky zpracovatele modelu.
4. Ve vazbě na předchozí tři faktory je zapotřebí vybrat kolektiv pracovníků, kteří se na budování modelu budou podílet. Zároveň je potřeba vyhledat subdodavatele (pokud je zapotřebí) pro práce, které potřebují specifickou kvalifikace, nebo práce na které nemá zpracovatel potřebné prostředky.
5. Řešitel rozhodne o vhodném softwaru v s přihlédnutím na možnosti hardwaru.

Přímé a inverzní modelování

Při řešení většiny úloh hydrodynamiky se vychází z předpokladu znalosti vlastností proudícího média (kapaliny) a hydrodynamických vlastností prostředí, v němž kapalina proudí. Při praktických aplikací je často třeba spokojit se vzhledem k omezeným finančním možnostem řešitele a nedostatku času a informací s přibližnými údaji, zdůvodněnými odbornými odhady a předpoklady. Tento způsob řešení se nazývá ***přímé modelování***.

Snahou je v co možná největší míře využít výsledků pozorování jevů a měření veličin ve studované oblasti proudění. Za předpokladu, že známe výsledek řešení (například z měření na prototypu nebo fyzikálním modelu), lze určit některé parametry modelu, které jsou při přímém modelování určeny odhadem (například hydraulickou vodivost horninového prostředí, drsnost

stěn potrubí nebo říčního koryta apod.). Metodu umožňující získat hodnoty parametrů modelu nazýváme *inverzním modelováním* [12], [13], [14]

5.2.4 Mýty a pověry o MKP

Z matematického hlediska představuje metoda konečných prvků (MKP)

- v širším smyslu numerickou metodu řešení (parciálních) diferenciálních rovnic (v kontinuu)
- v užším smyslu jen techniku diskretizace kontinua. Podstatou řešení je pak některá z variačních metod.

V technické praxi se ukázalo, že při řešení úloh mechaniky poddajných těles se nejvíce osvědčila právě metoda konečných prvků. MKP se v posledních letech stala téměř monopolem při řešení numerické analýzy mechanických soustav poddajných těles. Je součástí řady inženýrských programových prostředků: ADINA, NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, MARC...

V rámci průmyslových aplikací vznikla v souvislosti s MKP řada předsudků a mýtů.

- Nejnebezpečnějším mýtem je “slepá” víra, že vypočtené výsledky jsou správné.
Za správnost řešení, tedy i výsledku, ručí vždy výpočtář, nikoli software či metoda. Metoda se může použít nevhodným způsobem jvorbě ak ze stránky modelování soustavy (rozhodnutí jestli 1D, 2D, 3D...), tak i ze stránky použitých výpočtových postupů (lineární x nelineární, statický x dynamický)
- Výpočet MKP je věrohodnější než analytický výpočet.
V mnoha případech, kdy jsou postupy řešení normovány a odzkoušeny praxí, dává analytické řešení přesnější a rychlejší výsledky.
- Výpočet MKP je rychlejší než analytický.
Vlastní výpočet je mnohdy daleko rychlejší, ale tvorba modelu bývá velmi náročná.

Obecně platí, že v praxi by měl být MKP považován za prostředek, nikoliv cíl. Z tohoto hlediska je důležité zvážit nejen, zdali MKP použít, ale i jak ho použít [12], [13], [14].

5.2.5 Postup při tvorbě matematického a numerického modelu

Při tvorbě matematických modelů je vhodné dodržení následujícího postupu.

1. Definice cílů – před samotným řešením problému, je nutné si ujasnit jaké cíle (výstupy) se požadují. S tím je spjata i výběr vhodného softwaru (hardwaru), kolektivu řešitelů. V tomto bodě se také, v závislosti na požadovaném výstupu, určí předběžně finanční a časová náročnost modelu. Obecně platí, že čím je model obecnější, tím je finančně, časově a personálně náročnější.
2. Základní rovnice – Při tvorbě modelů se využívá zpravidla teoretický aparát klasické deterministické teorie mechaniky kontinua, tj. zákony zachování, zákony o změně entropie a entalpie a stavové rovnice. Při řešení konkrétní úlohy musí být matematický model doplněn o počáteční a okrajové podmínky.
3. Zjednodušující předpoklady (schematizace) – se zavádí, aby se zmenšil počet neznámých, čímž se i zmenší počet rovnic, což vede k zjednodušení algoritmu a také k nižším nákladům při tvorbě modelu.
4. Metoda řešení – je závislá na typu rovnice, okrajových a počátečních podmínkách. (matematická x experimentální [přímá x nepřímá])
5. Algoritmizace úlohy – spočívá ve zpracování postupu (předpisu) řešení dané úlohy, s častým využitím vývojových diagramů.
6. Programování úlohy – za pomoci vhodného programovacího jazyka.
7. Numerické testy – mají ověřit správnost použitého algoritmu a sestaveného programu. Obvykle vychází z řešení jednoduchého příkladu, u nějž je znám výsledek, který je řešen většinou analyticky.
8. Kalibrace – spočívá v úpravě modelu tak, aby jeho výsledky se shodovaly (přibližovaly) s výsledky měřeními na prototypu, popřípadě jinak získané.
9. Verifikace – slouží k porovnání hodnot získaných na modelu (po kalibraci) s hodnotami měřeními na prototypu, které ale nebyly použity pro kalibraci.
10. Simulace – vybraných stavů nakalibrovaným a verifikovaným modelem umožní sledovat průběh fyzikálního děje, který je předmětem zkoumání. Výsledky řešení jsou podkladem pro rozhodování ve fázi projektování, výstavby a provozu.

Zákony zachování, stavové rovnice, okrajové a počáteční podmínky

Každý matematický model je obecně tvořen soustavou rovnic, ať už se jedná o rovnice algebraické, diferenciální, integrální či integro-diferenciální. Tyto rovnice jsou doplněny okrajovými a počátečními podmínkami. Okrajové podmínky předepisují stav na hranici oblasti

a počáteční podmínky určují stav na počátku řešení (tedy v čase $t = 0$). Při stavbě matematického modelu se vychází ze základních zákonů mechaniky kontinua a ze stavových rovnic.

Základními, nejčastěji používanými jsou zákony zachování:

- Hmotnosti
- Hybnosti
- Energie

A zákony o změně

- Hybnosti
- Entalpie

Stavové rovnice vázkou mezi sebou stavové veličiny a doplňují počet rovnic na počet neznámých, které se v daném problému vyskytnou.

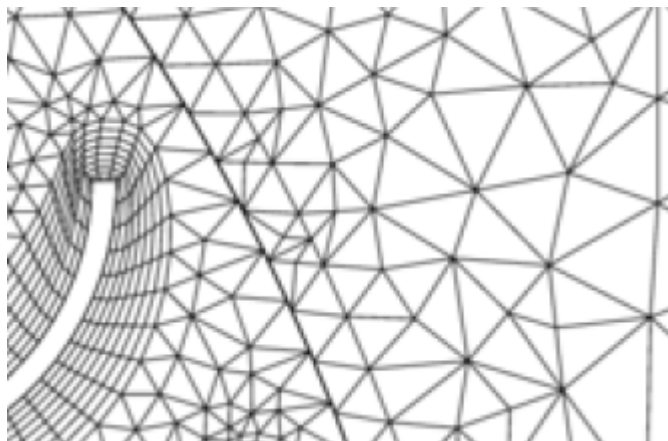
Přesnost výsledků získaných z matematického modelu závisí na přesnosti, s jakou matematický popis děje vystihuje reálné vzájemné vztahy jednotlivých stavových veličin a do jaké míry se podaří přiřadit v konkrétním případě parametrům modelu (charakterizující vlastnosti prostředí – např. hydraulickou vodivost, drsnost stěn, apod.) výstižné hodnoty [12], [13], [14].

Zjednodušující předpoklady

- **Základní předpoklady** – Mechanika kapalin se zabývá rovnováhou sil za klidu a pohybu kapaliny. Přitom nezkoumá pohyb molekul kapaliny, neboť to je předmětem kinetické teorie kapalin. Místo toho se zavádí pojem “elementární objem kapaliny“, což je objem velmi malý vzhledem k poměrům oblasti proudění, ale dostatečně velký vzhledem k délce volné dráhy molekul. Kapalina je považována za kontinuum, předpokládá její volná pohyblivost a za běžných tlakových a teplotních poměrů zanedbatelná stlačitelnost.
- **Předpoklad stacionarity** – Často užívaným zjednodušením je i předpoklad časové nezávislosti hydrodynamických dějů, které jsou jindy na čase závislé. To se používá především v případech, kdy změny parametrů (teplota, tvar oblasti řešení) a okrajových podmínek jsou v čase malé a v podstatě neovlivní charakter proudění. V praxi se pak

vybere ze všech možných stavů, ten který vychází nejméně příznivě z hlediska cílů řešení.

- **Snížení rozměrovosti úlohy** – Když vezmeme v úvahu předpokládaný směr proudění, tak můžeme zanedbat, v určitých případech, změny hledaných veličin v některém z rozměrů, a výrazně si tak zjednodušit výpočet. Snížení rozměrovosti je občas nutné vzhledem k případné hardwarové a časové náročnosti řešení úlohy a to zejména u prostorových a nestacionárních typů úloh. Veškerá tato zjednodušení vedou na řešení 2D či 1D úloh. Běžně se dnes v hydrodynamice využívá jednorozměrných úloh při řešení proudění a transportu látek v systému vodotečí nebo trubních systémů, kde se zanedbávají složky vektorů rychlostí kolmých na podélnou osu toku či potrubí. Dvojměrné schematizaci se využívá zejména u úloh proudění vody horninovým prostředím, a řešení proudění vody v mělkých nádržích.
- **Hydrologické a klimatické poměry** – Dříve než se začnou pořizovat nákladná vstupní data, data pro kalibraci a verifikaci modelu, je zapotřebí se rozhodnout, jak bude celé řešení koncipováno s ohledem na podrobnost a na časové horizonty, v nichž je zapotřebí daná data získat. Mezi základní data pro většinu úloh v hydrodynamice patří hydrologické a klimatické poměry dané oblasti (průtoky, teploty, srážky apod.). Zjednodušení zde spočívá v převedení vstupních parametrů (srážky, teploty, průtokové poměry) na statistické veličiny. Kupříkladu při návrhu koryta se bude vycházet z hodnoty Q_N (průměrný n-letý průtok), která bude sloužit k určení polohy hladiny u stacionárního modelu. V případě určování koncentrace látek v toku (ukazatel kvality vody) se bude vycházet z méně příznivých průtokových poměrů např. Q_a (dlouhodobý průměrný průtok) či Q_{355} (355denní průtok). V ČR poskytuje tyto informace nejčastěji ČHMÚ, který je oprávněn úředně hodnoty poskytovat.
- **Tvar a rozměry náhradní oblasti** – Vzhledem k tomu, že se jedná o matematický zápis reálného světa, který je velmi členitý a má spoustu mezer a děr, je nemožné vystihnout naprosto přesně reálnou geometrii. V závislosti na typu užitého softwaru a výkonu hardwaru je nutné geometrii zjednodušit a rozdělit na jednotlivé části (prvky), které se skládají z bodů a vazeb mezi nimi.

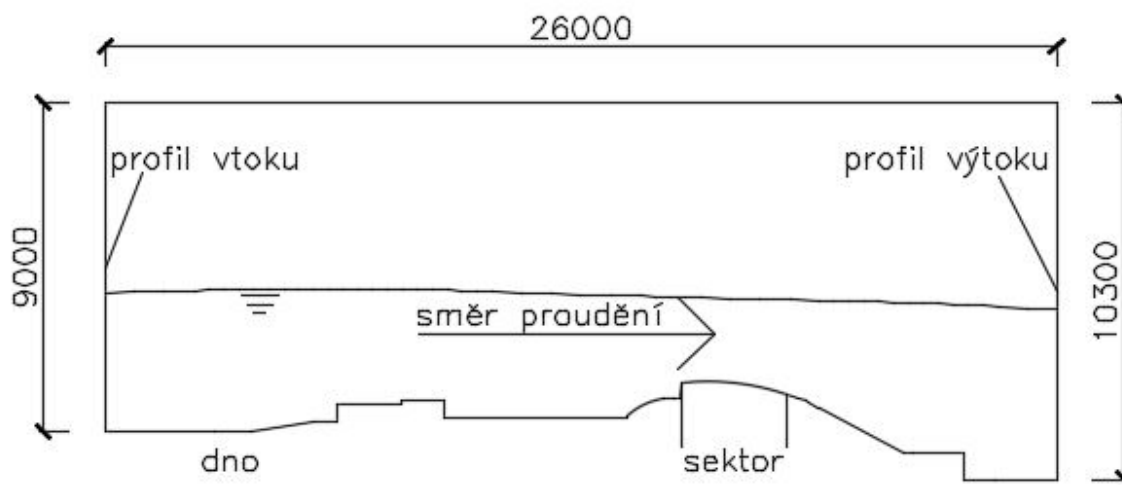


Obr. 5.2 Ukázka rozdělení nepravidelné oblasti na jednotlivé buňky [8]

K tomuto účelu je velmi vhodná metoda konečných prvků, která v této oblasti vyniká svou tvarovou přizpůsobivostí, díky čemuž relativně přesně vystihuje skutečný tvar řešené oblasti.

- **Vlastnosti kapaliny** – Základním médiem při proudění je kapalina, v oboru vodních staveb a vodního hospodářství voda. Nejčastěji přijímanými předpoklady jsou homogenita a izotropie kapaliny, nestlačitelnost a konstantní hustota neovlivněná teplotou, nesenými částicemi a rozpuštěnými látkami [12], [13], [14].

kdy docházelo k problému, byla 151,5 m n. m., což je o 5,41 m výše než je kóta horního dna, tudíž se zvolila jako horní hranice oblasti přímka s odlehlostí 9 m nad horním dnem.



Obr. 6.2 Vytvořená oblast připravená k exportu do ANSYSu

I když ANSYS v sobě funkci na import souborů ve formátu DWG má, musel se zvolit postup odlišný, neboť klasický CAD soubor nebyl schopen ANSYS správně načíst. Z nabízených formátů pro import do ANSYSu se zvolily ACIS soubory (.sat). Což se také neobešlo bez překážek, neboť AutoCAD exportuje s defaultně nastaveným převodem z palců na cm. Tato chyba se musela vždy opravit přímo v textovém editoru.

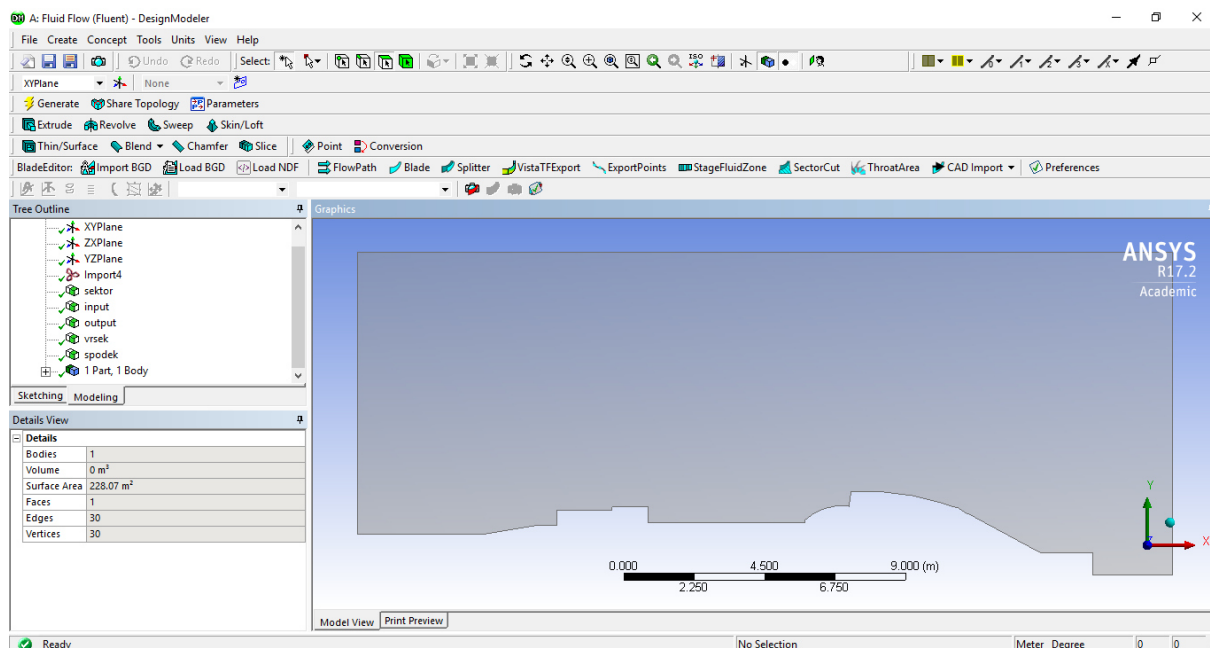
Hodnota 1 000, která je zvýrazněna na obr. 7.1, je volena z důvodu přepočtu měřítka používaného v CADu (metry) do měřítka používaného v ANSYSu (milimetry).


```
geo_zv_1 - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
700 175 1 0
16 Autodesk AutoCAD 19 ASM 221.0.0.1871 NT 24 Sat Oct 29 14:21:01 2016
1000 9.9999999999999995e-007 1e-010
body $-1 -1 $-1 $1 $-1 $-1 #
lump $-1 -1 $-1 $-1 $2 $0 #
shell $-1 -1 $-1 $-1 $-1 $3 $-1 $1 #
face $4 -1 $-1 $-1 $5 $2 $-1 $6 forward double out #
color-adesk-attrib $-1 -1 $-1 $-1 $3 256 #
loop $-1 -1 $-1 $-1 $7 $3 #
plane-surface $-1 -1 $-1 527.2276670537326 -372.72139535006204 0 0 0 1 1 0 0 forward_v I I I I #
coedge $-1 -1 $-1 $8 $9 $-1 $10 reversed $5 $-1 #
coedge $-1 -1 $-1 $11 $7 $-1 $12 reversed $5 $-1 #
coedge $-1 -1 $-1 $7 $13 $-1 $14 reversed $5 $-1 #
edge $15 -1 $-1 $16 0 $17 6 $7 $18 forward @7 unknown #
coedge $-1 -1 $-1 $19 $8 $-1 $20 reversed $5 $-1 #
edge $21 -1 $-1 $22 0 $16 3.0058383541198737 $8 $23 forward @7 unknown #
coedge $-1 -1 $-1 $9 $24 $-1 $25 reversed $5 $-1 #
edge $26 -1 $-1 $17 0 $27 26 $9 $28 forward @7 unknown #
color-adesk-attrib $-1 -1 $-1 $-1 $10 256 #
vertex $-1 -1 $-1 $12 $29 #
vertex $-1 -1 $-1 $14 $30 #
straight-curve $-1 -1 $-1 513.90757007965317 -375.62383551697349 0 0 1 0 F 0 F 6 #
coedge $-1 -1 $-1 $31 $11 $-1 $32 forward $5 $-1 #
edge $33 -1 $-1 $34 0 $22 0.98706765209044534 $11 $35 forward @7 unknown #
color-adesk-attrib $-1 -1 $-1 $-1 $12 256 #
vertex $-1 -1 $-1 $20 $36 #
straight-curve $-1 -1 $-1 516.91340843377304 -375.62383551697349 0 -1 0 0 F 0 F 3.0058383541198737 #
coedge $-1 -1 $-1 $13 $37 $-1 $38 reversed $5 $-1 #
edge $39 -1 $-1 $27 0 $40 7.29999999999992724 $13 $41 forward @7 unknown #
color-adesk-attrib $-1 -1 $-1 $-1 $14 256 #
vertex $-1 -1 $-1 $14 $42 #
straight-curve $-1 -1 $-1 513.90757007965317 -369.62383551697349 0 1 0 0 F 0 F 26 #
point $-1 -1 $-1 513.90757007965317 -375.62383551697349 0 #
point $-1 -1 $-1 513.90757007965317 -369.62383551697349 0 #
coedge $-1 -1 $-1 $43 $19 $-1 $44 reversed $5 $-1 #
edge $45 -1 $-1 $34 0 $46 1.7229045243424685 $19 $47 forward @7 unknown #
color-adesk-attrib $-1 -1 $-1 $-1 $20 256 #
```

Obr. 6.3 Úprava měřítka

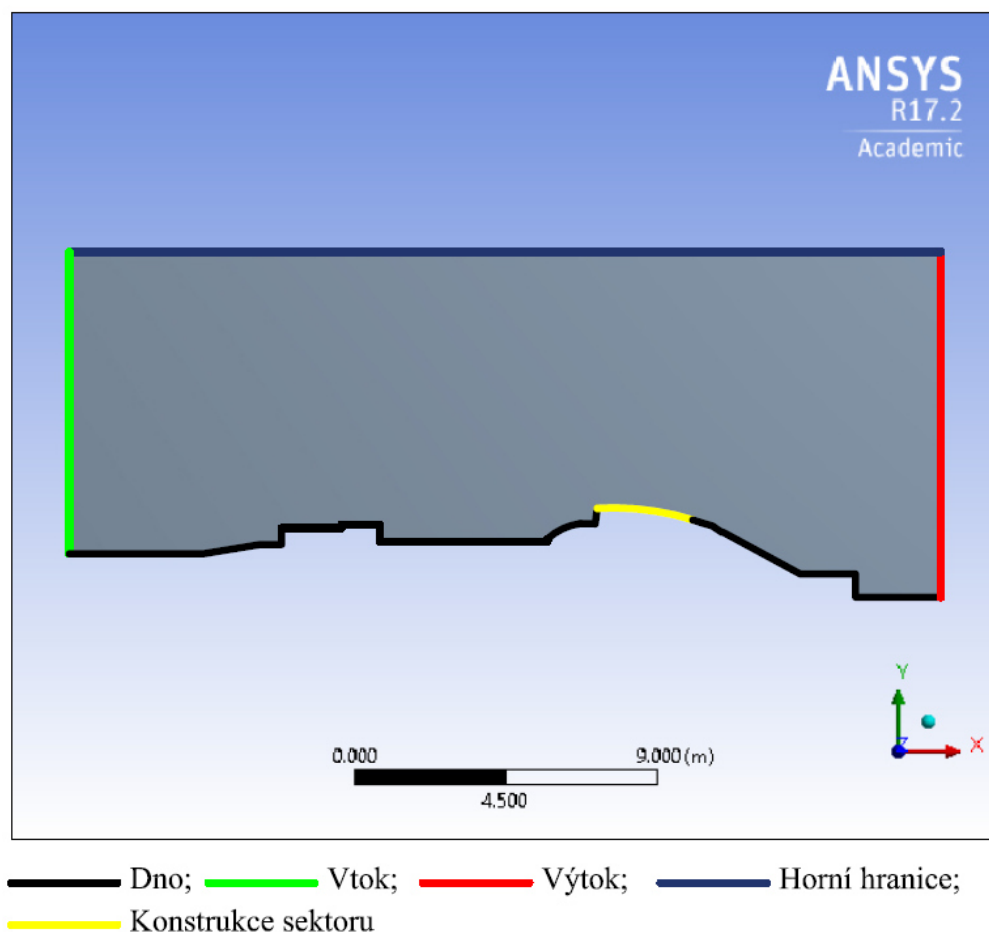
6.2 MESHOVÁNÍ

S připravenou geometrií se mohla začít práce v programu založeném na MKP, v tomto případě ANSYS 17.2. Celá práci se dělala ve vizuálním prostředí Workbench, které funguje jako prostředník mezi jednotlivými aplikacemi, kterými ANSYS disponuje. Geometrie se naimportovala pomocí aplikace DesignModeler.



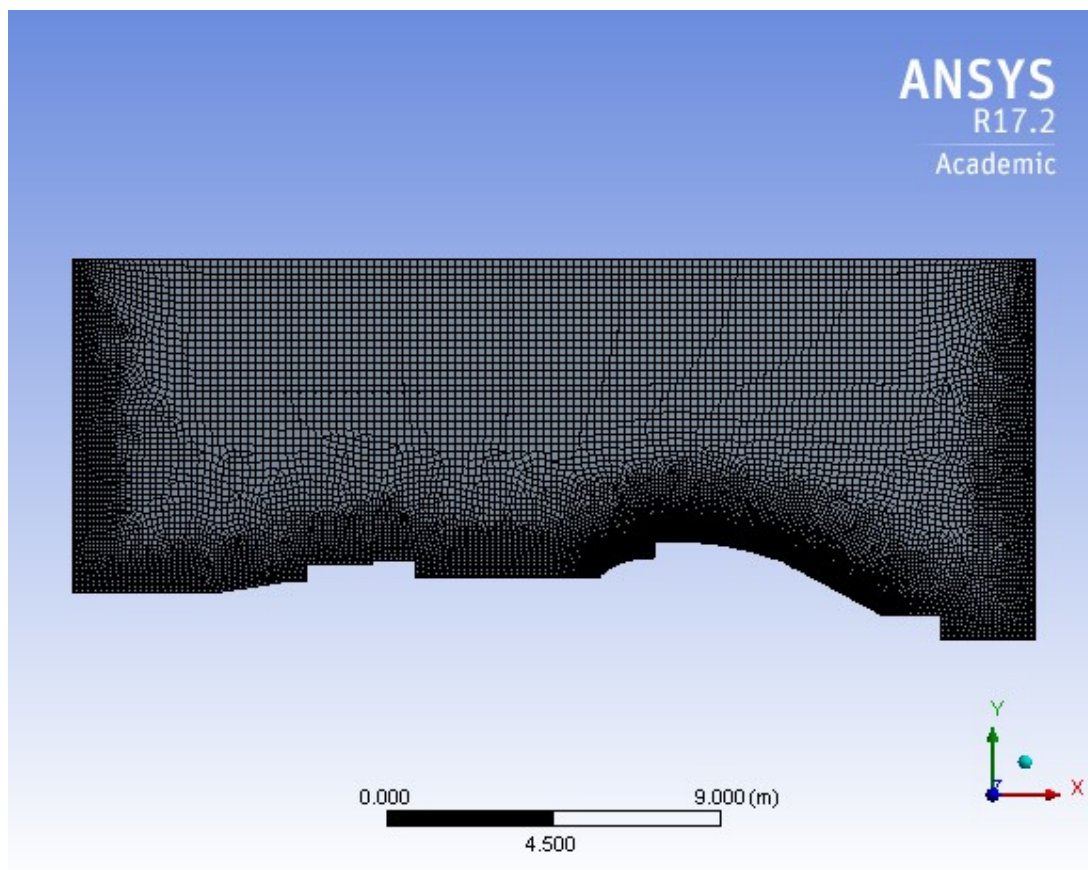
Obr. 6.4 Geometrie oblasti výpočtu

Zde se pojmenovala každá z hran této oblasti, neboť je to užitečné pro další práci, například v okamžiku kdy se budou volit okrajové a počáteční podmínky nebo při vytváření požadovaných výstupů. Další krok byl nastavení meshování. Na jednotlivé hrany (viz. obrázek níže v textu) se zvolily potřebné hodnoty parametru, které předaly informaci softwaru, jakým způsobem zvolenou oblast rozdělit, k tomu ANSYS využívá přednastavené algoritmy. V tomto případě se volila možnost CFD (Computational Fluid Dynamics – výpočet dynamického proudění). Jedním z nejdůležitějších parametrů, který bylo nutno nastavit, je minimální velikost jednotlivých hran elementů, na které se oblast rozdělí.



Obr. 6.5 Názvy hranic

Hranice Vtok, Výtok a částečně Dno, se rozdělila na této hranici s krokem 75 mm, na hranici, kde se budou získávat potřebná data (konstrukce sektoru), je nutné volit dělení hustší, v tomto případě 25 mm. Další důležitý parametr je Grow Rate (míra růstu), který udává, kolikrát se maximálně zvětší hrana elementu vůči hraně elementu předchozímu (ve směru od hranice dále). Veškeré hranice měly nastaveny hodnotu 1.05, což značí, že každá další hrana elementu bude maximálně o 5% větší než předchozí. Maximální hodnota velikosti hran elementu byla nastavená na hodnotu 200 mm. Výsledkem pak byla oblast rozdělena na 18 420 elementů a 18 849 bodů (obr. 7.6).



Obr. 6.6 Mesh oblasti

6.3 OKRAJOVÉ A POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

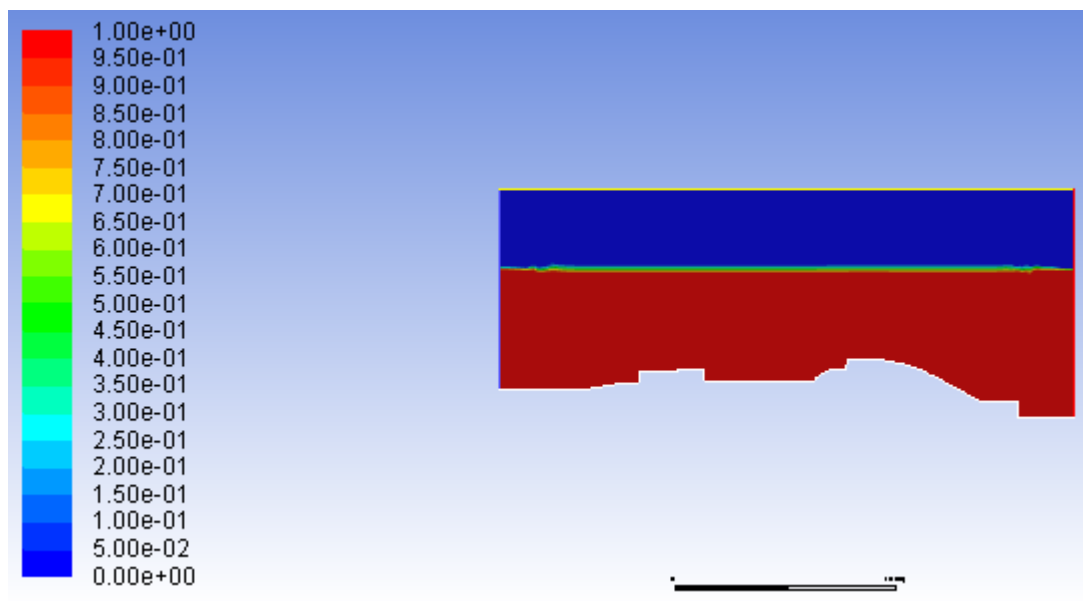
Jak už bylo zmíněno výše, pro každou úlohu je potřebné znát počáteční a okrajové podmínky. Jako okrajové podmínky zde poslouží data naměřená v průběhu převádění velkých vod a polohy jednotlivých hladin, které byly použity při modelovém výzkumu. Data se nejdříve musela upravit do jednotného výškového systému, neboť data z modelového výzkumu byla v metrech jako takových, ale hodnoty z měření na vodním díle byly ve výškových metrech. Pro převod posloužila oblast výpočtu (obr. 7.2), kde jako referenční bod byl použit levý spodní roh oblasti (146,09 m n. m.), navíc byl do tohoto bodu vložen počátek souřadného systému pro práci v softwaru.

Tabulka 6.1 Hodnoty použity pro okrajové podmínky

Datum sklápění	Horní hladina	Dolní hladina	Průtok	Poloha prav. pole	Rozdíl hladin	Referenční poloha hladiny	
	[m n. m.]	[m n. m.]	[m ³ ·s ⁻¹]	[m n. m.]	[m]	Nadjezí [m]	Podjezí [m]
02.03.2011	149.67	149.62	897	147.29	0.05	3.58	3.53
02.02.2013	149.91	149.80	1 241	147.29	0.11	3.82	3.71
02.06.2013	151.54	151.50	2 668	147.29	0.04	5.45	5.41
Kalibrační hodnoty dle modelového výzkumu							
Poloha jezu	Horní hladina	Dolní hladina	Průtok	Poloha prav. pole	Rozdíl hladin	Referenční poloha hladiny	
	[m n. m.]	[m n. m.]		[m n. m.]	[m]	Nadjezí [m]	Podjezí [m]
0.7 H	149.89	149.08		147.46	0.81	3.80	2.99
0.8 H	149.89	149.35		147.46	0.54	3.80	3.26
0.9 H	149.89	149.62		147.46	0.27	3.80	3.53

Poloha nejnižšího bodu v geometrii	Nadjezí	Podjezí
	[m n. m.]	[m n. m.]
	146.09	144.79

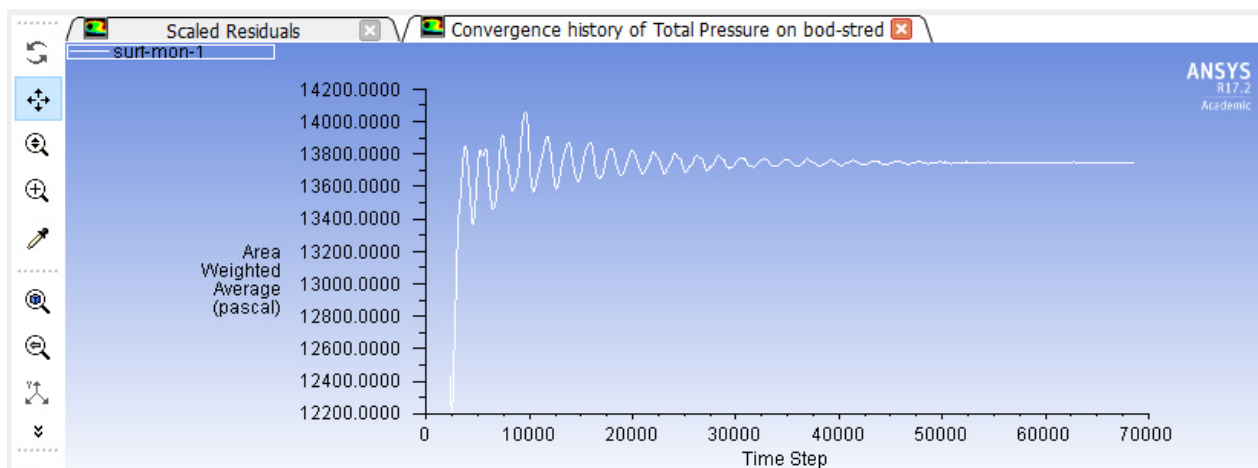
Počáteční podmínky při řešení kteréhokoliv stavu byly nastaveny tak, aby oblast byla vyplněna vodou do úrovně horní hladiny. Kalibrační data byla přizpůsobena stavům, které odpovídaly při modelovém výzkumu [6]. Data týkající se povodňových průtoků byla převzata ze zprávy o analýze havárie podpěrných patek, kterou zpracovala společnost HYDROPOL (viz. kapitola 4).



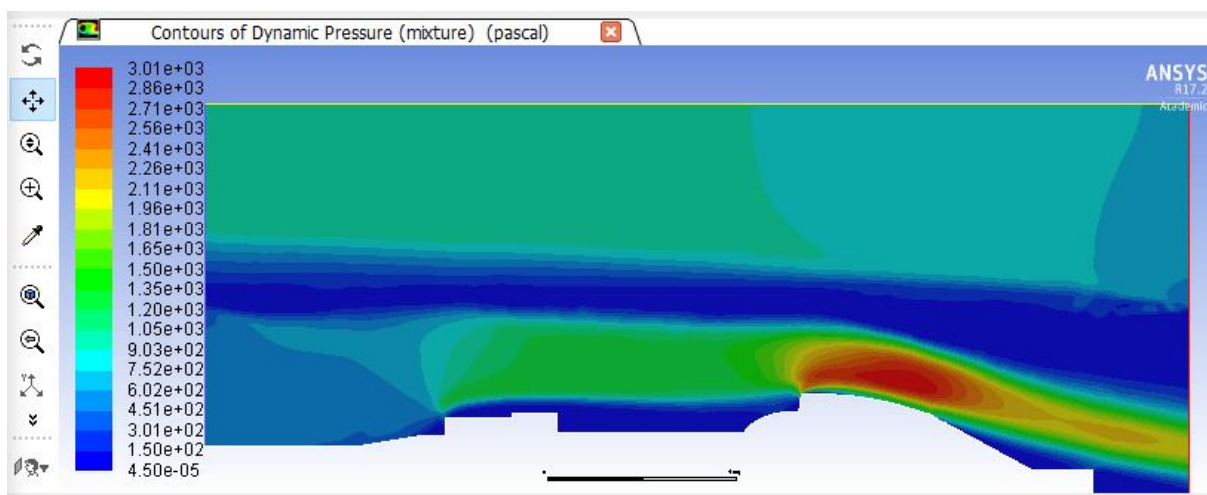
Obr. 6.7 Počáteční podmínky (1_voda;2_vzduch)

6.4 VÝPOČET

Samotný výpočet si pak software řídí sám, byla potřeba mu zadat, který z modelů si má vybrat. V tomto případě se využil turbulentní model k-epsilon (realizable) proudění v multifázovém prostředí dvou kapalin (vzduch, voda). Úloha se řešila jako neustálené proudění s pevně nastavenými okrajovými podmínkami (Tabulka 7.1). Nastala otázka, kdy se má výpočet zastavit, respektive kdy je možné považovat výpočet za ustálený. V tomto případě se volil postup sledování vybraných bodů na konstrukci v průběhu výpočtu. Na obrázku 7.8 můžeme vidět pozvolné přibližování se k výsledku.



Obr. 6.8 Průběžné výsledky tlaků v bodě umístěném na sektoru

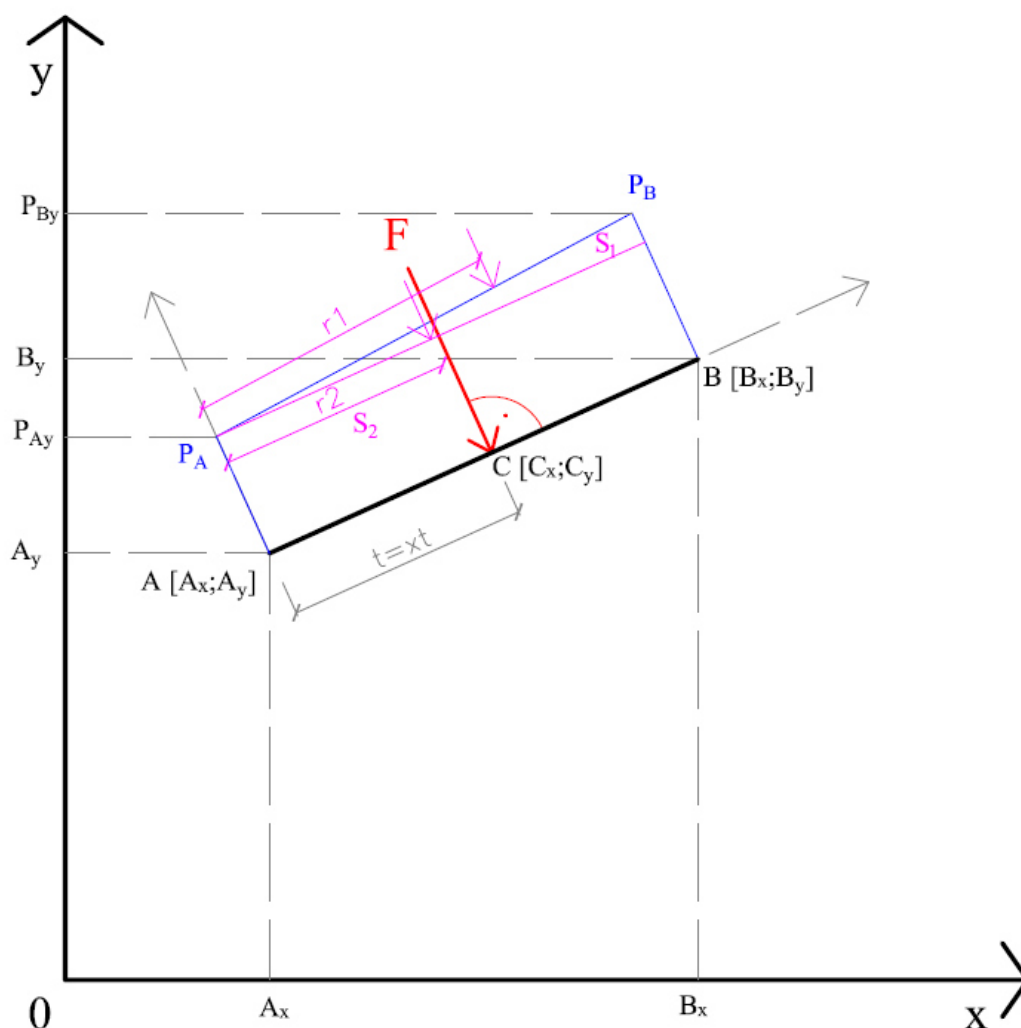


Obr. 6.9 Ukázka výstupu dynamického tlaku

6.5 VYHODNOCENÍ VÝSTUPŮ

Výstupy z programu byly ve formátu `.txt` a obsahovaly x-ové a y-ové souřadnice všech bodů ležících na hranici s názvem konstrukce sektoru (viz. obr. 7.5) a také obsahovaly hodnoty tlaků v těchto bodech. Hranice se tedy rozdělila na dílčí úseky (s délkou 25 mm) přelivné plochy. Požadovaný výsledek je moment vyvolaný hydrodynamickým účinkem tekoucí vody na vzdušní líc konstrukce. Úloha teda zní následovně: převést rozložení tlaků na sílu, určit její působíště a rameno. Postup řešení je následující

- Vynesou se dva libovolné sousedící body na sektoru a jejich hodnoty tlaků do souřadného systému (viz obr 7.10).



Obr. 6.10 Schéma zjištění velikosti síly F

- Jako první se určí velikost t , která se spočítá jako velikost souřadnice x_t v rovnici o těžišti rovinných složených obrazců (7.1). V tomto případě je osa souřadného systému pootočená ve směru úsečky AB , a její počátek je v bodě A .

$$x_t = \sum_n^i \frac{S_i \cdot r_i}{S_i} \quad (7.1)$$

Kde

x_t	[m]	vzdálenost od těžiště ve směru osy x,
S_i	[m ²]	plocha dílčího obrazce,
r_i	[m]	vzdálenost těžiště obrazce od počátku souřadného systému,

- Další neznámá je poloha bodu C , tedy přesněji souřadnice bodu C . Ty se zjistí, když se do parametrického vyjádření rovnice AB (rovnice 7.3, 7.4) vloží hodnota parametru, která se spočte jako poměr velikosti t a úsečky AB (rovnice 7.2).

$$p = \frac{|AB|}{t} \quad (7.2)$$

Kde

p	[-]	hodnota parametru,
$ AB $	[m]	velikost úsečky AB ,
t	[m]	vzdálenost AC , spočtená v rovnici 7.1,

$$x = A_x + p \cdot u_x \quad (7.3)$$

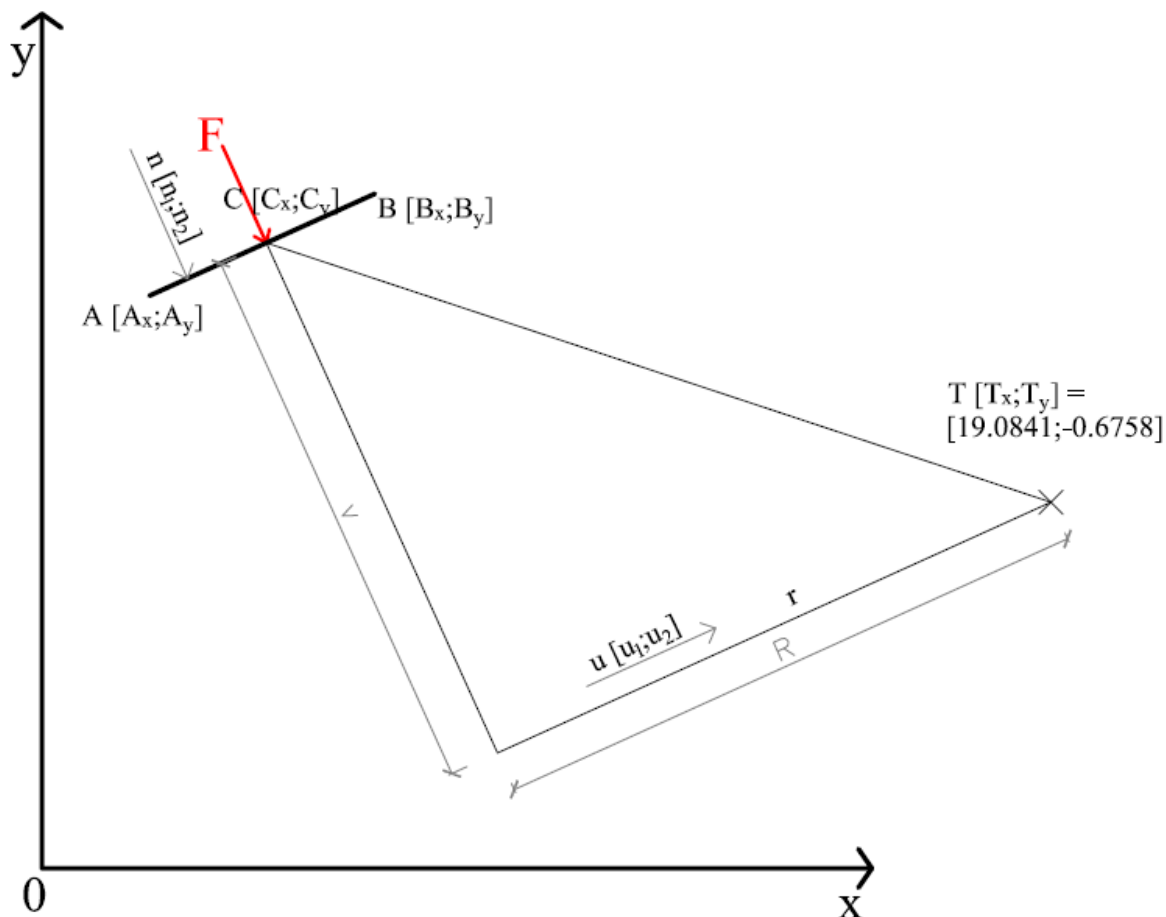
$$y = A_y + p \cdot u_y \quad (7.4)$$

Kde

$A_x; A_y$	[m]	souřadnice bodu A ,
p	[-]	hodnota parametru,
$u_x; u_y$	[-]	souřadnice směrového vektoru,

- Tím se dostanou souřadnice C_x (7.4) a C_y (7.5).
- Dále zbývá určit velikost ramene síly R . Rameno je kolmé na směr působící síly F a jedním jeho bodem je střed otáčení T [19,0841;-0,6758] (počátek soustavy je shodně jako v geometrii umístěn v jejím levém dolním okraji).

- Dalším krokem se určila vzdálenost (v) (7.6) bodu C od přímky (r), která je rovnoběžná s úsečkou AB (kolmá na směr síly F) a prochází bodem T. Přímka se získá jako obecná rovnice přímky. Členy a , b jsou hodnoty normálového vektoru úsečky AB, a člen c se získá dosazením bodu T do této rovnice (7.5).



Obr. 6.11 Určení ramene síly F

$$c = -(n_x \cdot T_x + n_y \cdot T_y) \quad (7.5)$$

Kde

$n_x; n_y$ [-] souřadnice normálového vektoru,

$T_x; T_y$ [m] souřadnice středu otáčení konstrukce,

$$v = \frac{|a \cdot C_x + b \cdot C_y + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (7.6)$$

Kde

v	[m]	kolmá vzdálenost bodu C a přímky r ,
a, b, c	[-]	parametry obecné rovnice přímky r ,
$C_x; C_y$	[m]	souřadnice bodu C,

- Velikost ramene R se spočte pomocí Pythagorovy věty, když velikost přepony TC se určí jako vzdálenost mezi dvěma body.
- Síla F se spočítá vynásobením průměrného tlaku délkou úsečky AB

$$F = \frac{(P_A + P_B)}{2} \cdot |AB| \quad (7.7)$$

Kde

F	[N]	výsledná síla,
$P_A; P_B$	[Pa]	hodnoty tlaků v bodech A a B,
$ AB $	[m]	velikost úsečky AB,

- Výsledný dílčí moment se spočte vynásobením síly F a ramena R . Tento postup se opakuje pro veškeré body. Na závěr se veškeré dílčí momenty sečtou a výsledkem je výsledný moment způsobeným hydrodynamickým účinkem přepadající vody $M_{Př}$.
-

$$M_{Př} = \sum_n^i R_i \cdot F_i \quad (7.8)$$

Ukázka dílčích tlaků a momentů i celkový moment je pro jeden ze tří kalibračních stavů předloženy v tabulkách 7.2, 7.3 a 7.4. V tabulce 7.4 je na konci srovnání momentu vypočteného z výstupu z programu ANSYS a momentu, který byl spočten podle podkladů z modelového výzkumu.

Tabulka 6.2 Výsledné dílčí momenty určené z výsledků matematického modelu na jeden metr šířky konstrukce (1/3)

Momenty vyvolané hydrodynamickým účinkem vody						
Kalibrace polohy 0.9H						
č.bodu	x	y	tlak	F	R	M _#
[-]	[m]	[m]	[Pa]	[N]	[m]	[Nm ⁻³]
94	15.75	1.36	14 065.66	332	3.20	1 064
96	15.78	1.36	12 636.22	315	3.18	1 003
98	15.80	1.36	12 662.51	316	3.16	1 000
100	15.83	1.36	12 722.95	317	3.15	999
102	15.85	1.36	12 765.75	318	3.13	996
104	15.88	1.36	12 799.01	319	3.11	992
106	15.90	1.36	12 825.86	320	3.09	988
108	15.93	1.37	12 848.90	320	3.07	985
110	15.95	1.37	12 870.39	321	3.06	982
112	15.98	1.37	12 891.43	322	3.04	979
114	16.00	1.37	12 912.82	323	3.02	976
116	16.03	1.37	12 934.92	324	3.00	973
118	16.05	1.37	12 957.99	325	2.98	970
120	16.08	1.37	12 982.71	326	2.96	966
122	16.10	1.37	13 009.13	327	2.94	963
124	16.13	1.37	13 036.46	328	2.93	959
126	16.15	1.37	13 063.90	329	2.91	956
128	16.18	1.37	13 091.53	330	2.89	952
130	16.20	1.37	13 119.58	330	2.87	948
131	16.23	1.37	13 147.80	331	2.85	943
129	16.25	1.37	13 175.82	332	2.83	939
127	16.28	1.37	13 203.79	332	2.81	934
125	16.30	1.37	13 231.72	333	2.79	929
123	16.33	1.37	13 259.35	333	2.77	924
121	16.35	1.37	13 286.87	334	2.76	919
119	16.38	1.37	13 314.31	334	2.74	914
117	16.40	1.37	13 341.89	334	2.72	908
115	16.43	1.37	13 369.36	334	2.70	903
113	16.45	1.37	13 396.70	335	2.68	897
111	16.48	1.37	13 424.10	335	2.66	891
109	16.50	1.37	13 451.42	335	2.64	886
107	16.53	1.36	13 478.69	336	2.62	881
105	16.55	1.36	13 505.60	337	2.60	877
103	16.58	1.36	13 532.26	337	2.59	872
101	16.60	1.36	13 559.05	338	2.57	867
99	16.63	1.36	13 585.65	339	2.55	862
97	16.65	1.36	13 612.14	339	2.53	858
95	16.68	1.36	13 638.74	340	2.51	853
93	16.70	1.36	13 665.55	340	2.49	848
92	16.73	1.35	13 692.19	341	2.47	843
91	16.75	1.35	13 718.42	342	2.45	838
90	16.78	1.35	13 745.16	342	2.43	833
89	16.80	1.35	13 772.19	343	2.41	828
88	16.83	1.35	13 799.25	344	2.39	824
87	16.85	1.35	13 826.36	345	2.38	820

Tabulka 6.3 Výsledné dílčí momenty určené z výsledků matematického modelu na jeden metr šířky konstrukce (2/3)

č.bodu	x	y	tlak	F	R	M _#
[-]	[m]	[m]	[Pa]	[N]	[m]	[Nm ⁻¹]
86	16.88	1.34	13 853.57	347	2.36	817
85	16.90	1.34	13 880.91	348	2.34	812
84	16.93	1.34	13 908.35	349	2.32	808
83	16.95	1.34	13 935.75	349	2.30	802
82	16.98	1.34	13 963.31	349	2.28	796
81	17.00	1.33	13 991.08	349	2.26	789
80	17.03	1.33	14 019.24	349	2.24	782
79	17.05	1.33	14 047.66	350	2.22	777
78	17.07	1.33	14 076.31	351	2.20	772
77	17.10	1.32	14 105.28	352	2.18	767
76	17.12	1.32	14 134.46	353	2.16	763
75	17.15	1.32	14 163.26	355	2.14	759
74	17.17	1.31	14 192.46	356	2.12	756
73	17.20	1.31	14 221.93	357	2.10	751
72	17.22	1.31	14 251.67	358	2.08	746
71	17.25	1.30	14 281.78	359	2.06	740
70	17.27	1.30	14 312.22	359	2.04	733
69	17.30	1.30	14 342.33	358	2.02	725
68	17.32	1.29	14 372.88	358	2.00	718
67	17.35	1.29	14 404.15	359	1.98	712
66	17.37	1.29	14 435.83	360	1.96	707
65	17.40	1.28	14 467.68	361	1.95	702
64	17.42	1.28	14 499.46	362	1.93	697
63	17.45	1.28	14 531.31	364	1.91	693
62	17.47	1.27	14 563.76	365	1.89	688
61	17.50	1.27	14 596.46	365	1.87	682
60	17.52	1.27	14 629.38	366	1.85	675
59	17.54	1.26	14 662.77	366	1.83	668
58	17.57	1.26	14 696.72	366	1.81	662
57	17.59	1.25	14 731.14	367	1.79	656
56	17.62	1.25	14 765.88	368	1.77	650
55	17.64	1.24	14 800.78	369	1.75	644
54	17.67	1.24	14 835.79	370	1.73	639
53	17.69	1.24	14 871.02	371	1.71	634
52	17.72	1.23	14 906.90	372	1.69	628
51	17.74	1.23	14 943.33	373	1.67	621
50	17.77	1.22	14 979.90	373	1.65	615
49	17.79	1.22	15 016.86	374	1.63	609
48	17.81	1.21	15 054.42	376	1.61	604
47	17.84	1.21	15 092.43	377	1.59	599
46	17.86	1.20	15 130.84	379	1.57	594
45	17.89	1.20	15 169.57	380	1.55	588
44	17.91	1.19	15 208.57	379	1.53	579
43	17.94	1.19	15 247.94	380	1.51	573
42	17.96	1.18	15 287.75	381	1.49	567
41	17.99	1.18	15 328.00	383	1.47	562
40	18.01	1.17	15 368.75	386	1.45	558

Tabulka 6.4 Výsledné dílčí momenty určené z výsledků matematického modelu na jeden metr šířky konstrukce (3/3)

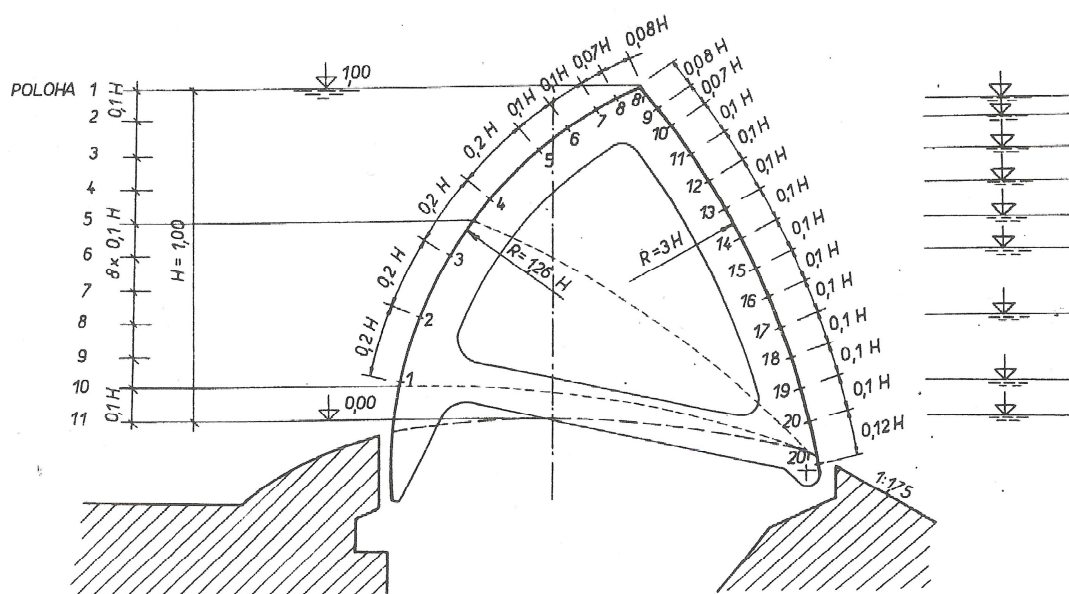
č.bodu	x	y	tlak	F	R	M _#
[-]	[m]	[m]	[Pa]	[N]	[m]	[Nm ⁻¹]
39	18.03	1.16	15 410.40	387	1.43	552
38	18.06	1.16	15 450.50	387	1.41	544
37	18.08	1.15	15 489.29	386	1.39	535
36	18.11	1.15	15 526.26	387	1.37	529
35	18.13	1.14	15 567.90	390	1.35	524
34	18.16	1.14	15 611.61	392	1.33	520
33	18.18	1.13	15 659.51	393	1.30	513
32	18.20	1.12	15 706.51	393	1.28	505
31	18.23	1.12	15 752.21	393	1.26	497
30	18.25	1.11	15 797.06	394	1.24	490
29	18.28	1.10	15 841.58	396	1.22	485
28	18.30	1.10	15 886.37	399	1.20	480
27	18.32	1.09	15 931.40	399	1.18	473
26	18.35	1.08	15 976.63	399	1.16	464
25	18.37	1.08	16 022.41	399	1.14	456
24	18.40	1.07	16 068.80	401	1.12	450
23	18.42	1.06	16 115.24	403	1.10	444
22	18.44	1.06	16 162.20	405	1.08	438
21	18.47	1.05	16 211.81	405	1.06	429
20	18.49	1.04	16 261.96	406	1.04	422
19	18.52	1.04	16 311.18	407	1.02	415
18	18.54	1.03	16 361.31	408	1.00	408
17	18.56	1.02	16 411.99	410	0.98	402
16	18.59	1.02	16 463.26	411	0.96	394
15	18.61	1.01	16 514.27	405	0.94	380
14	18.64	1.00	16 563.71	406	0.92	373
13	18.66	0.99	16 612.79	407	0.90	366
12	18.68	0.99	16 662.31	409	0.88	359
11	18.71	0.98	16 712.06	410	0.86	352
10	18.73	0.97	16 761.98	411	0.84	345
9	18.75	0.96	16 810.42	412	0.82	337
8	18.78	0.96	16 861.16	414	0.80	330
7	18.80	0.95	16 914.38	415	0.78	323
6	18.82	0.94	16 968.04	416	0.76	316
5	18.84	0.93	17 020.64	417	0.74	308
4	18.87	0.92	17 071.18	418	0.72	301
3	18.89	0.92	17 118.96	420	0.70	293
2	18.91	0.91	17 167.54	421	0.68	285
Σ						89 997
Hodnota momentu vycházející z fyzikálního modelového výzkumu						93 828
Rozdíl v %						4.26

7 POUŽITÁ METODIKA VÝPOČTU CELKOVÉHO MOMENTU

Výpočet celkového otáčivého momentu se určí jako součet dílčích momentů. Tyto dílčí momenty se mohou rozdělit:

- momenty vyvolané hydrodynamickým účinkem přepadající vody přes vzdušní líc jezu
- momenty vyvolané hydrostatickým účinkem vody na vnitřní povrch přelivného líce sektoru při propojení tlakové komory s prostorem dolní a horní zdrže
- momenty vyvolané vlastní tíhou konstrukce
- momenty vyvolané vztakovou silou
- moment vyvolán třecí silou ve spárech

Pro zjednodušení se celá úloha se řešila vždy na 1 m šířky konstrukce. Hradicí výška konstrukce je $H = 2,7$ m. Polohy konstrukce a úrovně vzdutí hladiny se odvíjely od modelového výzkumu uskutečněného na katedře hydrotechniky ČVUT v Praze roku 1968 [6]. Při výzkumu bylo zkoumáno celkem 11 poloh sektoru. Kdy 1. poloha je poloha úplného zvednutí sektoru na kótu 149,89 m n. m. a další poloha je zmenšena o desetinu celkové hradicí výšky, tedy o 0,27 m. Poslední 11. poloha je na kótě 147,19 m n. m.



Obr. 8-1 Zobrazení poloh sektoru a hladin dolní vody při modelovém výzkumu [11]

7.1 MOMENTY VYVOLANÉ HYDRODYNAMICKÝM ÚČINKEM PŘEPADAJÍCÍ VODY PŘES VZDUŠNÍ LÍC JEZU

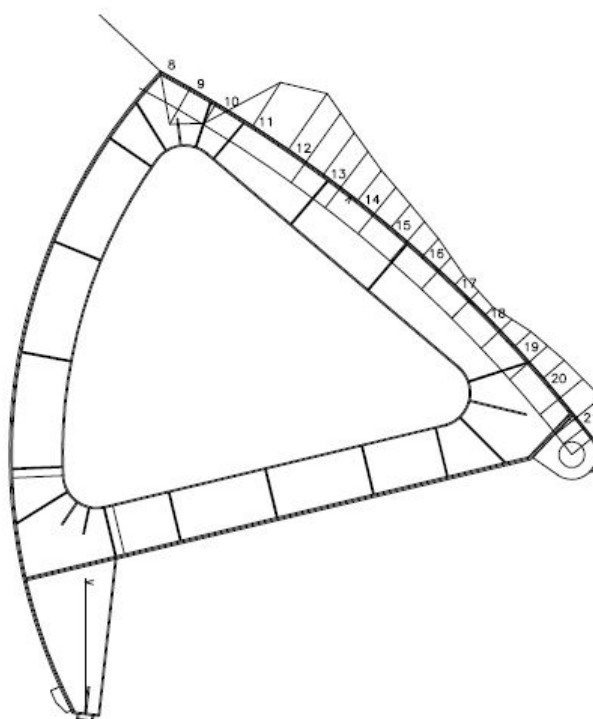
Voda přepadající přes vzdušní líc sektoru vyvolává hydrodynamickým účinkem síly. Tlakové výšky byly měřeny při podrobném hydrotechnickém modelovém výzkumu funkce jednoho z nejpoužívanějšího tvaru uzávěru. Účinek byl měřen piezometry a výsledná hodnota byla převedena na jednotkovou hradicí výšku H , kdy H je celková hradicí výška v metrech. V tomto případě $H = 2,7$ m. Každá takto změřená tlaková výška f_i působí na určitém dílčím úseku l_{xi} , kde předpokládáme konstantní tlak. Kolmá vzdálenost středu úseku l_{xi} ke středu čepu, a tedy ke středu otáčení konstrukce, je vzdálenost l . Všechny tyto veličiny jsem si změřil v programu AutoCAD 2013. Výsledný moment a síly **na jeden metr šířky konstrukce** potom dostaneme pomocí rovnic:

$$p_i = \rho \cdot g \cdot f_i \quad (8-1)$$

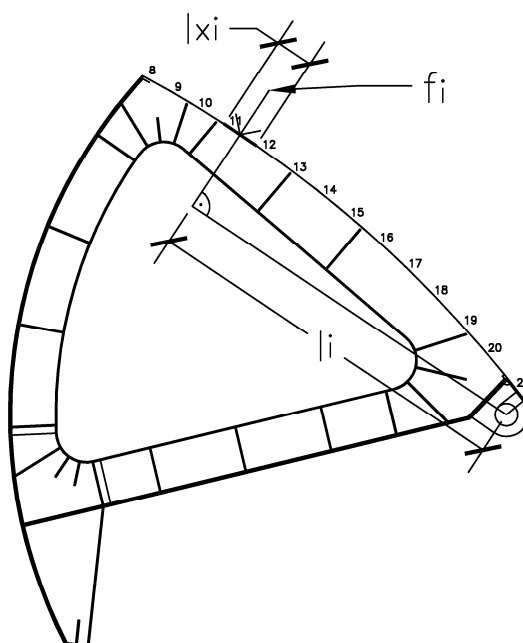
$$F_{při} = p \cdot l_{xi} \cdot 1 \text{ m} \quad (8-2)$$

$$M_{př} = \sum F_{při} \cdot l_i \cdot 1 \quad (8-3)$$

$M_{př}$	[N·m]	moment vyvolán přepadajícím paprskem na jeden metr konstrukce
f_i	[m]	tlaková výška naměřená při modelovém výzkumu
l_x	[m]	délka úseku, na který působí tlaková výška
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
l	[m]	rameno síly
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota vody
$F_{při}$	[N]	síla vyvolaná přepadovým paprskem na dílčím úseku
p_i	[Pa]	tlak působící na dílčím úseku



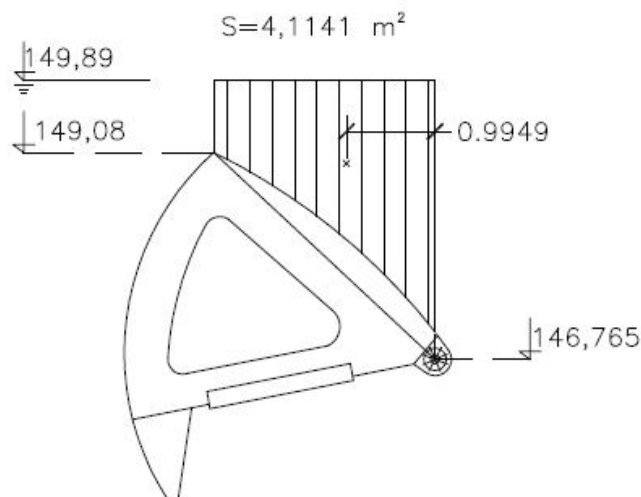
Obr. 8.2 Průběh tlaků na vzdušném líci a rozmístění piezometru



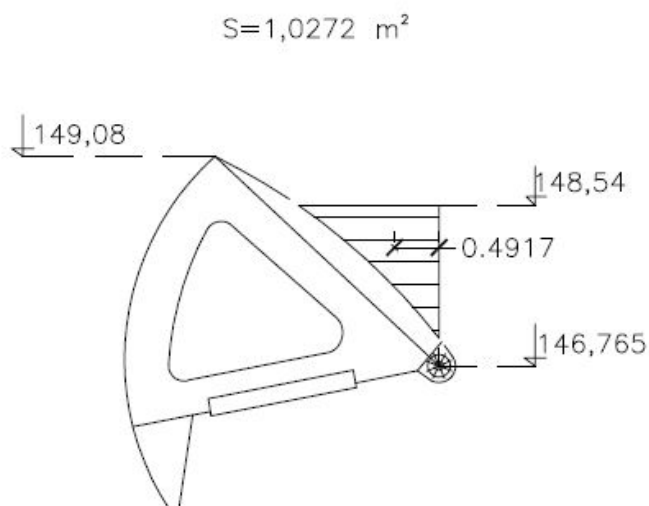
Obr. 8.3 Ukázka zjišťování dílčího úseku l_{xi} a ramene l_i

7.2 MOMENTY VYVOLANÉ HYDROSTATICKÝM ÚČINKEM VODY PŘI PROPOJENÍ TLAKOVÉ KOMORY S PROSTOREM HORNÍ NEBO DOLNÍ ZDRŽE

Výslednici hydrostatických sil vyvolující moment na válcovou plochu, která má tvořící přímky rovnoběžné s některou z os, můžeme rozdělit na složku síly horizontální a síly vertikální. Pro výpočet těchto sil bylo nutno zjistit plochu zatěžovacích obrazců. Pro každou pozici se uvažuje stav při propojení s horní zdrží a stav při propojení s dolní zdrží. Z toho vyplývá, že je nutno zjistit pro každý zatěžovací stav plochu horizontálního a vertikálního zatěžovacího obrazce vyvolaného vodou z horní zdrže a plochu horizontálního a vertikálního zatěžovacího obrazce vyvolaného vodou z dolní zdrže. Hledané momenty pak dostaneme vynásobením dané síly příslušným ramenem. Velikost ramene je pak rovna velikosti kolmice vedené ze středu hřídele na výslednici horizontální popřípadě vertikální síly. Plochy vertikálních složek jsem si kvůli jejich složitému tvaru odměřoval v programu AutoCAD 2013. K určení polohy těžiště jsem použil nadstavbu Centroid, která v zadané uzavřené oblasti vyznačí těžiště. Díky tvaru této konstrukce není potřeba řešit zatížení působící zevnitř na přelivný líc konstantního poloměru od osy otáčení, neboť vyvoluje vždy nulový moment vzhledem k ose otáčení konstrukce.

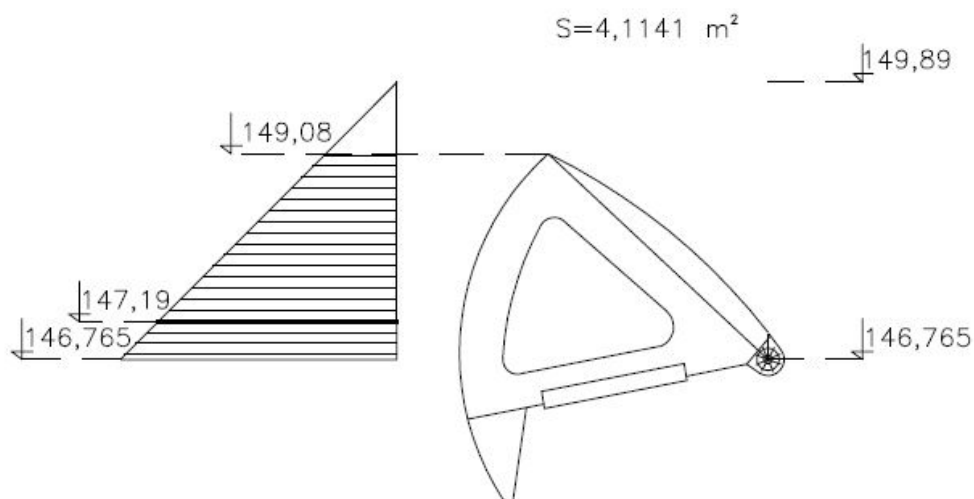


Obr. 8.4 Ukázka plochy vertikálního zatěžovacího obrazce při propojení tlakové komory s horní zdrží a polohy jeho těžiště

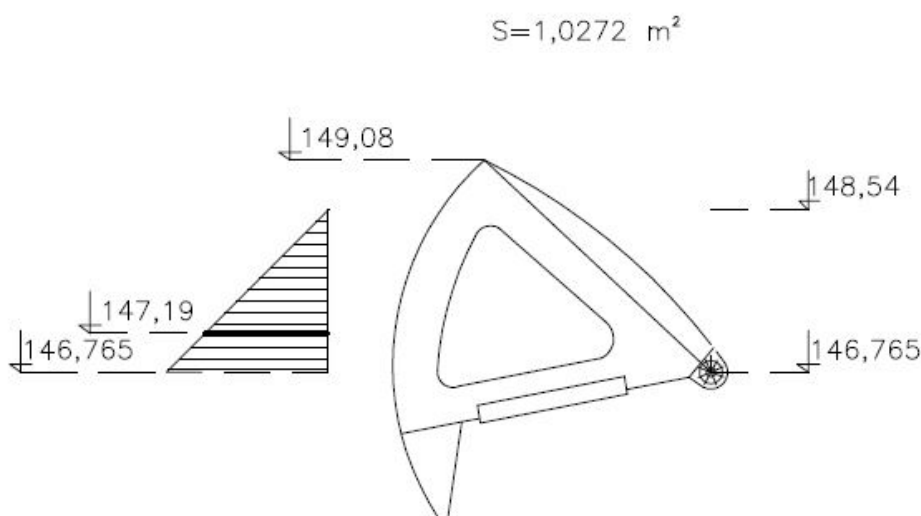


Obr. 8.5 Ukázka plochy vertikálního zatěžovacího obrazce při propojení komory s dolní zdrží a polohy jeho těžiště

Plochy zatěžovacích obrazců horizontálních složek můžeme vyjádřit jako rovnoramenné pravoúhlé trojúhelníky s velikostí odvěsny rovnou hloubky vody. Účinná plocha je pak brána pouze ode dna po největší úroveň konstrukce, jak je patrné z obrázku 8.5. Pokud je ale hladina níže než konstrukce, považujeme za velikost odvěsny pouze odlehlost dna a hladiny. Takový případ můžeme pozorovat na obrázku 8-6.



Obr. 8.6 Plocha horizontálního zatěžovacího obrazce při propojení komory s horní zdrží



Obr. 8.7 Plocha horizontálního zatěžovacího obrazce při propojení komory s dolní zdrží

Výsledné momenty jsem počítal v programu Microsoft Excel 2010. Výstup s propojenou horní a dolní zdrží je v tabulce 8.1. **Silové a momentové hodnoty jsou vztaženy na 1 m šířky konstrukce.**

	$F_i = S_i \cdot \rho \cdot g \cdot 1$	(8-4)
	$M_i = F_i \cdot r_i \cdot 1$	(8-5)

a	[m]	odlehlost mezi horní hladinou (149,89 m n. m.) a horní hranou jezu
S_{ver}	[m²]	velikost vertikální zatěžovací plochy
F_{ver}	[N]	síla vyvolaná vertikálním zatěžovacím obrazcem
r_{ver}	[m]	rameno síly vertikální
M_{ver}	[N·m]	moment vyvolán vertikální silou
S_{hor}	[m²]	velikost horizontální zatěžovací plochy
F_{hor}	[N]	síla vyvolaná horizontálním zatěžovacím obrazcem
r_{hor}	[m]	rameno síly horizontální
M_{hor}	[N·m]	moment vyvolán horizontální silou
M_{hsh}	[N·m]	celkový hydrostatický moment při propojení s horní zdrží
M_{hsd}	[N·m]	celkový hydrostatický moment při propojení s dolní zdrží

Tabulka 7.1 Moment vyvolaný hydrostatickým účinkem na jeden metr šířky konstrukce

Hydrostatický moment při propojení tlačné komory s horní zdrží

poloha	odleh.	a	S_{ver}	F_{ver}	r_{ver}	M_{ver}	S_{hor}	F_{hor}	r_{hor}	M_{hor}	M_{hsh}
[-]	[-]	[m]	[m ²]	[kN]	[m]	[kN·m]	[m ²]	[kN]	[m]	[kN·m]	[kN·m]
10	0.7	2.430	8.590	84.267	1.611	135.763	1.930	18.937	0.333	6.306	142.069
10	0.8	2.430	8.590	84.267	1.611	135.763	1.930	18.937	0.333	6.306	142.069
10	0.9	2.430	8.590	84.267	1.611	135.763	1.930	18.937	0.333	6.306	142.069
1. sklápění		2.210	7.656	75.107	1.616	121.396	1.613	15.824	0.306	4.834	126.230
2. sklápění		2.450	8.610	84.464	1.622	137.001	1.766	17.325	0.307	5.314	142.314
3. sklápění		4.040	13.765	135.037	1.640	221.420	2.780	27.275	0.311	8.485	229.905

Hydrostatický moment při propojení tlačné komory s dolní zdrží

poloha	odleh.	a	S_{ver}	F_{ver}	r_{ver}	M_{ver}	S_{hor}	F_{hor}	r_{hor}	M_{hor}	M_{hsd}
[-]	[-]	[m]	[m ²]	[kN]	[m]	[kN·m]	[m ²]	[kN]	[m]	[kN·m]	[kN·m]
10	0.7	2.315	5.892	57.796	1.586	91.670	0.589	5.774	0.905	5.228	96.898
10	0.8	2.585	6.791	66.620	1.597	106.365	0.662	6.489	1.109	7.199	113.564
10	0.9	2.855	7.690	75.443	1.605	121.063	0.734	7.204	1.333	9.603	130.666
1. sklápění		2.210	7.489	73.470	1.615	118.661	1.584	15.537	0.305	4.743	123.405
2. sklápění		2.450	8.090	79.365	1.619	128.500	1.696	16.638	0.306	5.094	133.594
3. sklápění		4.040	13.765	135.037	1.640	221.420	2.780	27.275	0.311	8.485	229.905

Poznámka: označení pořadí je uvedeno v kapitole 4, geometrické a průtokové charakteristiky jsou shrnuty v tab. 7.1.

7.3 MOMENTY VYVOLANÉ VLASTNÍ TÍHOU KONSTRUKCE

Hmotnost jednoho metru konstrukce je 1456 kg. Dle základních poznatků z fyziky víme, že těžiště je působíště tíhové síly, která působí na těleso. Se sklápěním sektoru se ovšem vodorovná vzdálenost mezi těžištěm konstrukce a středem čepu mění. Proto jsem si musel pomocí programu AutoCAD odměřit tyto vzdálenosti při všech polohách konstrukce. Celý výpočet jsem pak prováděl opět **na metr šířky** konstrukce.

$$M_g = m \cdot r \cdot g \cdot 1 \quad (8-6)$$

M_g	[N·m]	moment vyvolán vlastní tíhou konstrukce
m	[kg]	hmotnost konstrukce
r	[m]	vodorovná vzdálenost mezi těžištěm a středem čepu
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení

Tabulka 7.2 Moment vyvolaný vlastní tíhou

poloha	r	m	G	M_g
	[m]	[kg]	[kN]	[kNm]
10	2.017	1 456	14.283	28.808

Vzhledem k tomu, že se celá řešila pouze v jedné poloze (odpovídá poloze č. 10), budou veškeré hodnoty momentu vyvolaného vlastní tíhou konstrukce shodné.

7.4 MOMENTY VYVOLANÉ VZTLAKOVOU SÍLOU

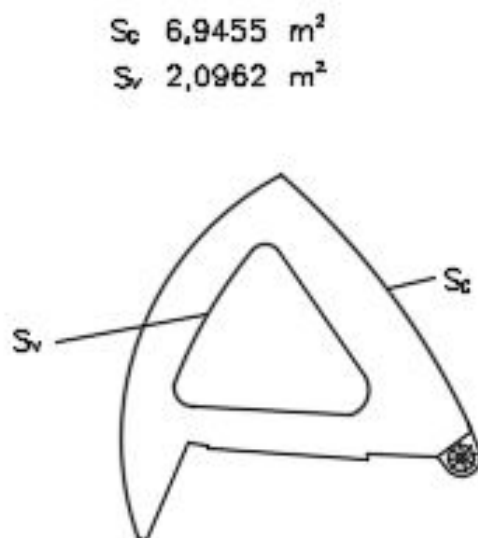
Dle Archimédova zákona (Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno silou, rovnající se tíze kapaliny, tělesem vytlačené) se musí také započítat vztlak od ponořených ocelových částí jezové konstrukce. K zjištění vztlaku je nutno zjistit objem ponořených částí. Ten zjistíme, když hmotnost konstrukce podělíme hustotou oceli, ze které je konstrukce vyrobena. Váha jednoho metru konstrukce činí **1 456 kg** a hustota oceli ρ_{Fe} je **7 850 kg/m³**.

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{Fe}}} \quad (8-7)$$

V	[m ³]	celkový objem oceli konstrukce
m	[kg]	hmotnost jednoho metru konstrukce
ρ_{Fe}	[kg·m ⁻³]	hustota oceli

Objem oceli je tedy 0,185 m³ na jeden metr. Tento objem je však veškeré oceli a nás zajímá pouze ponořený objem oceli. K zjištění hledaného objemu a následnému momentu vyvolaného vztlakovou silou jsem opět použil software AutoCAD 2013. Pomohl jsem si zavedením pomocných ploch, kterým jsem přiřazoval příslušný objem ponořené části. Pro zjednodušení výpočtu jsem uvažoval, že celá tato pomocná plocha je uvnitř vyplněná naprosto homogenním prostředím, a tudíž jsem mohl opět využít program Centroid, který v takto ohraničených plochách vyznačil těžiště. Pro pozici 1 se počítá s hydrostatickým vlivem dolní vody. U zbylých pozic (2-11) se s působením dolní vody na přelivný líc sektoru nepočítá, neboť uvažujeme, že vodní paprsek přepadající přes vzdušní líc “odtláčí” dolní vodu. Vztlak na ponořenou část plechu přelivného líce je zahrnut ve vyjádřených tlakových hodnotách na vnitřní a vnější povrch. Nejprve bylo nutné určit celkovou pomocnou plochu (S_p). Tu jsem si spočetl jako rozdíl plochy celkové (S_c) a plochy vnitřní části obrazce (S_v). Celková pomocná plocha má hodnotu **4,849 m²**.

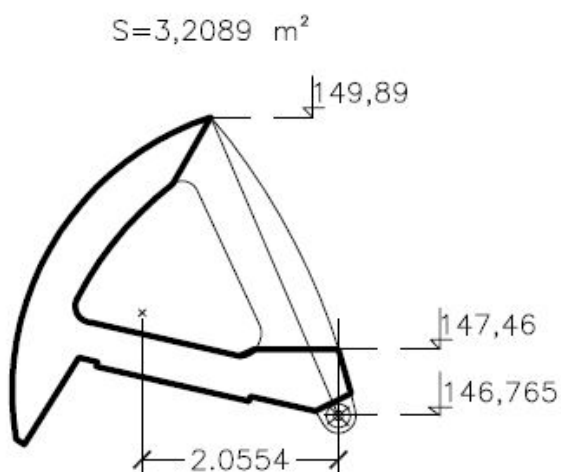
$$S_p = S_c - S_v \quad (8-8)$$



Obr. 7.8 Plocha celková a plocha vnitřní části

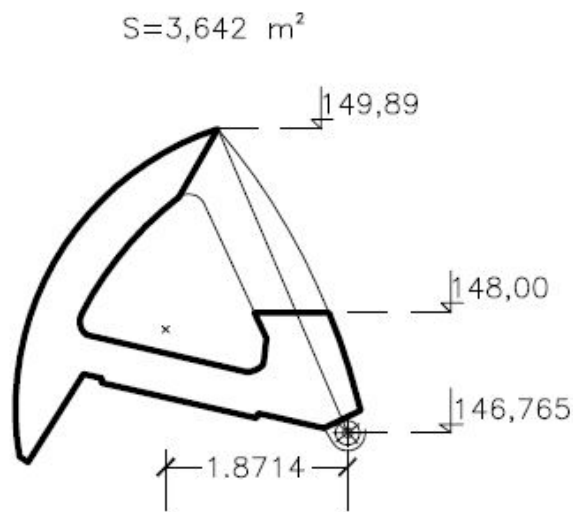
Této pomyslné ploše jsem posléze přiřadil celý objem oceli. Hledaný objem oceli, na který působí vztlak, se vyjádří z poměru změřené plochy ku celkové pomocné ploše a následným vynásobením celkovým objemem oceli.

$$V_{vz} = \frac{S}{S_p} \cdot V \quad (8-9)$$



Obr. 7.9 Pomyslná plocha pro pozici 1, úroveň dolní vody 147,46 m n. m.

Na obrázcích 8.9 a 8.10 jsou tučně znázorněny plochy S, které jsem odečetl z CADu.



Obr. 8.10 Plocha pro pozici 1, úroveň dolní vody 148,00 m n. m.

Znám-li tedy objem oceli ponořené do vody tak znám i objem vody ocelí vytlačenou. Z objemu vody pak určím vztlakovou sílu.

$$F_{vztl} = \rho_v \cdot V_{vz} \cdot g \quad (8-10)$$

F_{vztl}	[N]	vztlaková síla
ρ_v	[kg·m ⁻³]	hustota vody
V_{vztl}	[m ³]	objem ponořené oceli
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení

Moment se spočítá jako součin síly vztlakové a kolmé vzdálenosti mezi středem otáčení a těžištěm zatěžovacího obrazce. I zde se úloha vždy řešila na **jeden metr šířky** konstrukce.

$$M_{vztl} = F_{vztl} \cdot r \cdot 1 \quad (8-11)$$

M_{vztl}	[N·m]	vztlačový moment
F_{vztl}	[N]	vztlačová síla
r	[m]	rameno otáčení

Tabulka 7.3 Moment vyvolán vztlačovou silou na jeden metr šířky konstrukce

Moment vyvolaný vztlačovou silou při propojení s horní zdří

poloha	odlehlost	a	S	r	F	M_{vztlh}
[-]	[-]	[m]	[m ²]	[m]	[kN]	[kNm]
10	0.7	0.810	3.030	2.203	1.137	2.504
10	0.8	0.540	3.030	2.203	1.137	2.504
10	0.9	0.270	3.030	2.203	1.137	2.504

Moment vyvolaný vztlačovou silou při propojení s dolní zdří

poloha	odlehlost	a	S	r	F	$M_{vztl d}$
[-]	[-]	[m]	[m ²]	[m]	[kN]	[kNm]
10	0.7	0.810	4.849	2.017	1.819	3.670
10	0.8	0.540	4.849	2.017	1.819	3.670
10	0.9	0.270	4.849	2.017	1.819	3.670

7.5 CELKOVÝ MOMENT

Před celkovým součtem jednotlivých dílčích momentů si je třeba uvědomit, že bude vždy působit třecí moment. Ten je způsoben mechanickým dotlačováním těsnění. Byl stanoven na hodnotu $M_{trec} = 1,72 \text{ kN}\cdot\text{m}$ na jeden metr šířky konstrukce [6]. Jeho orientace bude uvažována vždy opačná oproti pohybu konstrukce. V konečném výsledku jsem volil kladnou orientaci ve směru zvedání konstrukce (ve směru chodu hodinových ručiček). Pokud se bude jednat o situaci, kdy se bude jez zvedat, tak třecí moment bude mít zápornou orientaci.

Celkový moment působící na celou konstrukci 54 m širokou se získá z uvedených jednotkových hodnot vynásobených šířkou.

Pro zvedání sektoru je uvažováno propojení tlačné komory s horní zdří a účinek momentu od třecí síly působí proti pohybu, a tudíž bude odečítán. Pro sklápění sektoru je uvažováno propojení tlačné komory s dolní zdří a účinek momentu od třecí síly působí proti pohybu, a tudíž bude přičítán.

8 VÝSTUPY Z MODELU A JEJICH POROVNÁNÍ

Smyslem této práce bylo určit výsledný celkový moment, který působil na konstrukci jezu v Roudnici nad Labem při povodňových stavech. Výsledný moment se určí součtem dílčích momentů, jak uvádí předcházející kapitola. Pro povodňové stavy ovšem chybí data (hodnoty momentů od hydrodynamického účinku proudu na přelivný líc), tato data se musela opatřit pomocí matematického modelu. Výstupem pak byly 3 stavy, které se modelovaly s okrajovými podmínkami shodnými s okrajovými podmínkami při stavech dosažených při modelovém výzkumu (tabulka 9.1). Další výstup pak byly 3 hodnoty momentů, chronologicky pojmenovaných podle data sklápění, při kterých došlo k poruše (2. 3. 2011; 2. 2. 2013; 2. 6. 2013).

Tabulka 8.1 Porovnání pozorovaných stavů

Poloha	M_{pf} kalibrační	M_{pf} spočtená	Rozdíl
[-]	[N·m]	[N·m]	[%]
0.7 H	93 828	89 997	-4.26
0.8 H	74 543	74 678	0.18
0.9 H	64 137	63 110	-1.63
		Průměr	-1.90

Tabulka 8.2 Moment vyvolané hydrodynamickým účinkem proudu působící na přelivný líc při povodňových stavech na jeden metr šířky konstrukce

Povodňové stavy: M_{pf}	
Označení sklápění	M_{pf}
[-]	[N·m]
1. sklápění	84 137
2. sklápění	86 840
3. sklápění	103 852

Poznámka: veškeré hodnoty momentů, které byly zde zmíněny, byly v absolutních hodnotách. Znaménková konvekce (záporné hodnoty ve směru sklápění a kladné ve směru zvedání konstrukce) je tedy uvedena v závěrečných tabulkách 9.3 a 9.4.

Tabulka 8.3 Výsledný moment při propojení s horní zdrží na jeden metr šířky konstrukce

		Propojení komory s horní zdrží				
Poloha sektoru (označení shodné s výzkumem na modelu)	Relativní odlehlost h_g/H hladiny dolní vody od nejnižší úrovně sklopného sektoru	Moment od vlastní tíhy sektoru	Momment od tlaku v komoře na vnitřní povrch vzdušního líce	Moment od hydrodyna mického účinku proudu na přelivný líc	Moment od vztaku ponořené části konstrukce	Moment celkový = součet dílčích momentů s odečtem třecího momentu 1.72 kNm při zvedání
		M_g	M_{hsh}	$M_{př}$	M_{vztih}	M_{celkh}
[-]	[-]	[kN·m·m ⁻¹]	[kN·m·m ⁻¹]	[kN·m·m ⁻¹]	[kN·m·m ⁻¹]	[kN·m·m ⁻¹]
Původní výzkum na modelu						
10	0.7	-28.808	142.069	-64.137	2.504	49.909
10	0.8	-28.808	142.069	-74.543	2.504	39.502
10	0.9	-28.808	142.069	-93.828	2.504	20.217
Matematický model						
kalibrace 0.7 H		-28.808	142.069	-63.110	2.504	50.936
kalibrace 0.8 H		-28.808	142.069	-74.678	2.504	39.367
kalibrace 0.9 H		-28.808	142.069	-89.997	2.504	24.048
Matematický model při modelování povodňových stavů						
1. sklápění		-28.808	126.230	-84.137	2.504	14.069
2. sklápění		-28.808	142.314	-86.840	2.504	27.450
3. sklápění		-28.808	229.905	-103.852	2.504	98.029

Tabulka 8.4 Výsledný moment při propojení s dolní zdrží na jeden metr šířky konstrukce

Poloha sektoru (označení shodné s výzkumem na modelu)	Relativní odlehlost h_g/H hladiny dolní vody od nejnižší úrovně sklopného sektoru	Propojení komory s dolní zdrží					Ovladatelnost sektoru propojovaním jeho komory s horní nebo dolní zdrží
		Moment od vlastní tíhy sektoru	Moment od tlaku v komoře na vnitřní povrch vzdušního líce	Moment od hydrodynamického účinku proudu na přelivný líc	Moment od vztaku ponořené části konstrukce	Moment celkový = součet dílčích momentů s přičtením třecího momentu 1.72 kNm při sklápění	
		M_g	M_{hsl}	M_{pf}	M_{vztid}	M_{celkd}	
[-]	[-]	[kN·m·m ⁻¹]	[kN·m·m ⁻¹]	[kN·m·m ⁻¹]	[kN·m·m ⁻¹]	[kN·m·m ⁻¹]	[-]
Původní výzkum na modelu							
10	0.7	-28.808	96.898	-64.137	3.670	9.342	NE
10	0.8	-28.808	113.564	-74.543	3.670	15.602	NE
10	0.9	-28.808	130.666	-93.828	3.670	13.419	NE
Matematický model							
kalibrace 0.7 H		-28.808	96.898	-63.110	3.670	10.369	NE
kalibrace 0.8 H		-28.808	113.564	-74.678	3.670	15.467	NE
kalibrace 0.9 H		-28.808	130.666	-89.997	3.670	17.250	NE
Matematický model při modelování povodňových stavů							
1. sklápění		-28.808	123.405	-84.137	3.670	15.849	NE
2. sklápění		-28.808	133.594	-86.840	3.670	23.335	NE
3. sklápění		-28.808	229.905	-103.852	3.670	102.635	NE

69

9 ZÁVĚR

Dle výsledků bylo zjištěno, že hodnoty momentu u zvedání jezového pole, v situaci propojení s horní zdrží, jsou vždy kladné (kladný směr momentu je ve směru hodinových ručiček), a proto není potřeba dalších přidavných momentů, neboť se jez bude vždy zvedat. V situaci, kdy je tlačná komora propojená s dolní zdrží, jsou všechny výsledné momenty také kladné. Tímto je prokázáno, že sklápění sektoru musí být prováděno pomocí dalších doprovodných přidavných opatření.

V případě 3. sklápění, ze dne 2. 6. 2013 se jedná dokonce o hodnotu převyšující $100 \text{ kNm}\cdot\text{m}^{-1}$. V tomto, ale i v ostatních případech, má největší podíl na vině poloha dolní vody, která při vyšších stavech vyvozuje velký moment M_{hsd} (Moment od tlaku v komoře na povrch vzdušního líce) v poměru k zbylým dílčím momentům.

Zajištění ovladatelnosti sektoru je proveditelné buď odčerpáním vody z prostoru tlačné komory, jak provozovatel za současného stavu extrémních průtoků realizuje, nebo umístěním dodatečného přetížení na stávající konstrukci.

10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Povodí Labe: Roudnice nad Labem. [cit. 2015-02-07]. Dostupné z: http://www.pla.cz/planet/public/vodnidila/zdl_roudnicenl.pdf.
- [2] PRŮCHA, Miloslav. 1980. *Jezy*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 292 s.
- [3] VÝBORA, Pavel. 1985. *Jezy*. 1. vyd. Brno: VUT, 146 s.
- [4] ŠULC, Jan 2014. *Tlakové a momentové poměry na sektorových uzávěrech jezu Roudnice*. Posudek. LVV-ÚVS-FAST VUT v Brně.
- [5] KANICKÝ, SVĚRÁK, ŠPERKA. *Analýza havárie podpěrných patek na sektorovém jezu*. Technická zpráva Hydropol Project & Management, a.s. Dokument č. 131-0701-4-SEG.
- [6] ČIHÁK, František 2005. *Posouzení funkce sektorového jezu v Roudnici nad Labem*.
- [7] BOOR, B.; Kunštátský, J.; Patočka, C.: *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. SNTL Praha, 1968.
- [8] FLUENT, ANSYS. *15.0 User scriptor Guide—Directory*.
- [9] JACOB BEAR AND ARNOLD VERRUIJT. *Modeling groundwater flow and pollution with computer programs for sample cases*. 2. Dordrecht: D. Reidel Pub. Co, 1987. ISBN 9789400933798.
- [10] MASE, George E. *Schaum's outline of theory and problems of continuum mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1970. ISBN 0070406634.
- [11] MEDŘICKÝ, Vladimír a Petr VALENTA. *Hydrotechnické stavby 1: navrhování jezů*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04309-7.
- [12] KOLÁŘ, Vladimír. *Metoda konečných prvků: určeno pro posl. stavební fak. 2. přepracované vydání*. Praha: SNTL, 1970. Učební texty vysokých škol.
- [13] ŘÍHA, Jaromír. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0827-8.
- [14] ŠPANIEL, Miroslav a Zdeněk HORÁK. *Úvod do metody konečných prvků*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 9788001046654.
- [15] Patrik Růžek *Stanovení zatěžovacích momentů sektoru jezového pole VD Roudnice nad Labem*. Brno, 2015. 65s., 2 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc
- [16] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). ISBN 9788071963455.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 7.1 Hodnoty použity pro okrajové podmínky	49
Tabulka 7.2 Výsledné dílčí momenty určené z výsledků matematického modelu 1/3	56
Tabulka 7.3 Výsledné dílčí momenty určené z výsledků matematického modelu 2/3	57
Tabulka 7.4 Výsledné dílčí momenty určené z výsledků matematického modelu 3/3	58
Tabulka 8.1 Moment vyvolaný hydrostatickým účinkem	65
Tabulka 8.2 Moment vyvolaný vlastní tíhou	66
Tabulka 8.3 Moment vyvolán vztlakovou silou	70
Tabulka 9.1 Porovnání pozorovaných stavů	71
Tabulka 9.2 Moment vyvolané hydrodynamickým účinkem proudu působící na přelivný líc při povodňových stavech	71
Tabulka 9.3 Výsledný moment při propojení s horní zdrží	72
Tabulka 9.4 Výsledný moment při propojení s dolní zdrží	72

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Poloha jezu na Labi	13
Obr. 2.2 Letecký snímek zdymadla v Roudnici nad Labem	17
Obr. 3.1 Schéma sektorového hydrostatického jezu: 1-válcová stěna, 2-přelivná stěna, 3-ložiska otáčení, 4-spodní stavba, 5-tlačná komora, 6-propojení komory s horní zdrží, 7-uzávěr potrubí č. 6, 8-propojení komory s dolní vodou, 9-uzávěr potrubí č. 8	19
Obr. 3.2 Schématický řez jezovým polem	19
Obr. 3.3 Pohled do vnitřku sektoru	20
Obr. 3.4 Pohled do prostoru tlačné komory	20
Obr. 4.1 Schématické znázornění poškození patek	22
Obr. 4.2 Ukázka rozložení vzduchu při sklopení sektoru	23
Obr. 4.2 Ukázka rozložení vzduchu při sklopení sektoru	23
Obr. 6.1 Pravoúhlá síť	30
Obr. 6.2 Ukázka rozdělení nepravidelné oblasti na jednotlivé buňky	42
Obr. 7.1 Řez pravým polem jezu	43
Obr. 7.2 Vytvořená oblast připravená k exportu do ANSYSu	44
Obr. 7.3 Úprava měřítka	44
Obr. 7.4 Geometrie oblasti výpočtu	46
Obr. 7.5 Názvy hranic	47
Obr. 7.6 Mesh oblasti	48
Obr. 7.7 Počáteční podmínky (1_voda;2_vzduch	50
Obr. 7.8 Průběžné výsledky tlaků v bodě umístěném na sektoru	51
Obr. 7.9 Ukázka výstupu dynamického tlaku	51
Obr. 7.10 Schéma zjištění velikosti síly F	52
Obr. 7.11 Určení ramene síly F	54
Obr. 8.1 Zobrazení poloh sektoru a hladin dolní vody při modelovém výzkumu [11]	59
Obr. 8.2 Průběh tlaků na vzdušném líci a rozmístění piezometrů	61
Obr. 8.3 Ukázka zjišťování dílčího úseku l_{xi} a ramene l_i	61
Obr. 8.4 Ukázka plochy vertikálního zatěžovacího obrazce při propojení tlakové komory s horní zdrží a polohy jeho těžiště	62
Obr. 8.5 Ukázka plochy vertikálního zatěžovacího obrazce při propojení komory s dolní zdrží a polohy jeho těžiště	63
Obr. 8.6 Plocha horizontálního zatěžovacího obrazce při propojení komory s horní zdrží	63

Obr. 8.7 Plocha horizontálního zatěžovacího obrazce při propojení komory s dolní zdrží	64
Obr. 8.8 Plocha celková a plocha vnitřní části	69
Obr. 8.9 Pomyslná plocha pro pozici 1, úroveň dolní vody 147,83 m n. m.	69
Obr. 8.10 Plocha pro pozici 1, úroveň dolní vody 148,41 m n.	70
Obr. 8.11 10. poloha jezu s vyznačenými polohami dolní vody	73

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$ AB $	velikost úsečky AB	[m]
A	odlehlost mezi horní hladinou (149,89 m n. m.) a horní hranou jezu	[m]
a, b, c	parametry obecné rovnice přímky r	[-]
$A_x; A_y$	souřadnice bodu A	[m]
$C_x; C_y$	souřadnice bodu C	[m]
F	výsledná síla	[N]
F_{hor}	síla vyvolaná horizontálním zatěžovacím obrazcem	[N]
f_i	tlaková výška naměřená při modelovém výzkumu	[m]
F_{ver}	síla vyvolaná vertikálním zatěžovacím obrazcem	[N]
F_{vz}	vztlačková síla	[N]
g	tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
l	rameno síly	[m]
l_x	délka úseku, na který působí tlaková výška	[m]
m	hmotnost jednoho metru konstrukce	[kg]
M_{celk}	celkový moment	[N·m]
M_g	moment vyvolán vlastní tíhou konstrukce	[N]
M_{hor}	moment vyvolán horizontální silou	[N·m]
$M_{\text{př}}$	moment vyvolán přepadajícím paprskem	[N]
M_{ver}	moment vyvolán vertikální silou	[N·m]
$n_x; n_y$	souřadnice normálového vektoru	[-]
p	hodnota parametru	[-]
$P_A; P_B$	hodnoty tlaků v bodech A a B	[Pa]
r	vodorovná vzdálenost mezi těžištěm a středem čepu	[m]
r_{hor}	rameno síly horizontální	[m]
r_i	vzdálenost těžiště obrazce od počátku souřadného systému	[m]
r_{ver}	rameno síly vertikální	[m]
S_{hor}	velikost horizontální zatěžovací plochy	[m ²]
S_i	plocha dílčího obrazce	[m ²]
S_{ver}	velikost vertikální zatěžovací plochy	[m ²]
t	vzdálenost AC, spočtená v rovnici 7.1	[m]
$T_x; T_y$	souřadnice středu otáčení konstrukce	[m]
$u_x; u_y$	souřadnice směrového vektoru	[-]

V	celkový objem oceli konstrukce	$[\text{m}^3]$
v	kolmá vzdálenost bodu C a přímky r	$[\text{m}]$
V_{vztl}	objem ponořené oceli	$[\text{m}^3]$
x_t	vzdálenost od těžiště ve směru osy x	$[\text{m}]$
ρ	hustota oceli	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_v	hustota vody	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$